NATURA-2009 : un modèle de prévision de la croissance à l'échelle du peuplement pour les forêts du Québec

Mémoire de recherche forestière n° 163
Direction de la recherche forestière

par

David Pothier et Isabelle Auger

Québec

NATURA-2009 : un modèle de prévision de la croissance à l'échelle du peuplement pour les forêts du Québec

Mémoire de recherche forestière n°163

par

David Pothier, ing.f., M. Sc., *Ph. D.*

et

Isabelle Auger, stat. ASSQ, M. Sc.

Gouvernement du Québec
Ministère des Ressources naturelles et de la Faune
Direction de la recherche forestière
2011

Mandat de la DRF

La Direction de la recherche forestière (DRF) a pour mandat de participer activement à l'amélioration de la pratique forestière au Québec en réalisant des travaux, principalement à long terme et d'envergure provinciale, qui intègrent des préoccupations de recherche fondamentale et appliquée. Elle subventionne aussi des recherches universitaires à court ou à moyen terme. Ces recherches, importantes pour le ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF), sont complémentaires aux travaux de la DRF ou réalisées dans des créneaux où elle ne s'implique pas. Elle contribue à la diffusion de nouvelles connaissances, d'avis et de conseils scientifiques et à l'intégration de ces nouvelles connaissances ou savoir-faire à la pratique forestière.

Les mémoires de recherche forestière de la DRF

Depuis 1970, chacun des Mémoires de recherche forestière de la DRF est révisé par un comité *ad hoc* formé d'au moins trois experts indépendants. Cette publication est produite et diffusée à même les budgets de recherche et de développement, comme autant d'étapes essentielles à la réalisation d'un projet ou d'une expérience. Ce document à tirage limité est également disponible dans notre site Internet en format pdf.

Vous pouvez adresser vos demandes à :

Ministère des Ressources naturelles et de la Faune
Direction de la recherche forestière
2700, rue Einstein, Québec (Québec)
Canada, G1P 3W8
Courriel : recherche.forestiere@mrnf.gouv.qc.ca
Internet : www.mrnf.gouv.qc.ca/forets/connaissances/recherche

© Gouvernement du Québec
On peut citer ce texte en indiquant la référence.

Toutes les publications produites par la Direction de la recherche forestière, du ministère des Ressources naturelles et de la Faune, sont protégées par les dispositions de la Loi sur le droit d'auteur, les lois, les politiques et les règlements du Canada, ainsi que par des accords internationaux. Il est interdit de reproduire, même partiellement, ces publications sans l'obtention préalable d'une permission écrite.

ISBN : 978-2-550-61630-6
ISBN (PDF) : 978-2-550-61631-3
F.D.C. 566
L.C. SD 553

Notes biographiques

David Pothier a obtenu un baccalauréat en génie forestier de l'Université Laval en 1982. Cette institution lui a aussi décerné un doctorat en sciences forestières en 1990 sur un sujet traitant de l'écophysiologie forestière appliquée à la sylviculture. Après un passage comme professeur en foresterie à l'Université de Moncton, il a occupé un poste de chercheur en sylviculture des forêts naturelles à la Direction de la recherche forestière du ministère des Ressources naturelles et de la Faune jusqu'en 2003. En plus de ses travaux de recherche de nature sylvicole, il a contribué à mettre au point un modèle de prévision de la production forestière dans le but d'améliorer les calculs de la possibilité forestière. Par la suite, il s'est joint au groupe de professeurs du Département des sciences du bois et de la forêt de l'Université Laval pour enseigner la sylviculture et la physiologie forestière et pour codiriger la chaire de recherche industrielle CRSNG-Université Laval en sylviculture et faune, dont les travaux se déroulent sur la Côte-Nord du Québec.

Isabelle Auger est statisticienne, diplômée de l'Université Laval depuis 1995. En 1997, le même établissement lui décerne un diplôme de maîtrise ès sciences. Depuis 1999, elle est à l'emploi de la Direction de la recherche forestière au sein de l'équipe de biométrie.

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué à une ou plusieurs étapes de l'élaboration du modèle : M. François Labbé, pour la validation des données de base, M. Ashkan Zahedi, M. Luc Langevin et Mme Xiaojing Guo, pour les analyses statistiques, et les membres du sous-groupe « Modélisation et succession » du Comité consultatif scientifique sur les intrants au calcul de la possibilité forestière, soit MM. Frédéric Raulier, Jean-Pierre Saucier, Mathieu Fortin, Daniel Mailly et Robert Jobidon. Nous remercions également la Direction des inventaires forestiers du ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF), qui a mis à notre disposition la banque de données des placettes-échantillons permanentes, la Direction de l'environnement et de la protection des forêts du MRNF, qui a fourni les relevés historiques de défoliation par la tordeuse des bourgeons de l'épinette, ainsi que les trois réviseurs anonymes, pour leurs conseils et commentaires sur une version préliminaire de cet ouvrage.

Les travaux d'édition et de mise en page de l'ouvrage ont été confiés à Mmes Denise Tousignant, Sylvie Bourassa et Maripierre Jalbert, respectivement.

Résumé

Le présent document décrit les caractéristiques et les résultats du modèle NATURA-2009, un modèle dynamique de prévision de la production forestière à l'échelle du peuplement, étalonné à partir de 8 011 placettes échantillons permanentes du réseau établi par le Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec. Pour pouvoir tenir compte des changements de composition des peuplements forestiers au fil des ans, cinq groupes d'espèces ont été formés sur la base de leurs principales caractéristiques de croissance. Puisque plusieurs placettes ont été durement touchées par l'épidémie de tordeuse des bourgeons de l'épinette (TBE) des années 1970-1980, les effets des défoliations de la TBE ont été modélisés à partir de relevés historiques de défoliation disponibles pour tout le Québec. Toutes les variables utilisées par le modèle peuvent être calculées ou tirées directement des inventaires forestiers usuels. Il s'agit principalement de la hauteur dominante, de l'âge, du nombre de tiges à l'hectare, de la surface terrière marchande, du volume marchand et du sous-domaine bioclimatique. Les résultats de NATURA-2009 ont été comparés à ceux du modèle de Pothier et Savard (1998) qui était utilisé jusqu'à tout récemment pour les calculs de la possibilité forestière du Québec. D'une façon générale, le biais et la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne des prévisions de NATURA-2009 étaient inférieurs à ceux générés par le modèle de Pothier et Savard (1998) dans le cas des peuplements dominés par le sapin baumier et, dans une moindre mesure, par ceux dominés par l'épinette noire. Cet avantage de NATURA-2009 peut être expliqué par l'introduction d'un indice tenant compte des effets de la TBE, ainsi que par la prise en compte de disparités régionales de croissance. Par ailleurs, dans le cas des peuplements dominés par des espèces non affectées par la TBE, NATURA-2009 et le modèle de Pothier et Savard (1998) ont produit des résultats similaires en termes de précision et d'exactitude. En conséquence, nous recommandons l'utilisation de NATURA-2009 de façon à préciser les futurs calculs de la possibilité forestière dans le cas des peuplements dominés par le sapin baumier et les épinettes blanche, rouge et noire qui couvrent une proportion importante du territoire forestier québécois. Le modèle NATURA-2009 est intégré à la plateforme CAPSIS 4.2.1. Des exemplaires de ce simulateur sont disponibles sur demande à l'adresse recherche.forestiere@mrnf.gouv.qc.ca.

Mots clés : modèle de croissance, modèle empirique, modèle dynamique, table de rendement, sapin baumier, épinette noire, tordeuse des bourgeons de l'épinette, précision, biais, simulation, production forestière.

Abstract

This document describes the characteristics and the results of NATURA-2009, a dynamic stand growth model calibrated using 8 011 permanent sample plots from a network established by the ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec. *To take into account changes in stand composition over time, five groups of species were formed, based on their main growth characteristics. Since several plots were affected by the spruce budworm outbreak that occurred from 1970 to 1990, the effects of this insect were modelled using historical records of defoliation available for all the Québec forested area. All variables included in the model can be calculated or directly obtained from usual forest inventories. The main variables are dominant height, tree age, number of trees per hectare, merchantable basal area, merchantable volume and bioclimatic sub-domain. The results of NATURA-2009 were compared to those obtained from the model of Pothier and Savard (1998), which was used until recently for allowable cut calculations in Québec. In general, NATURA-2009 resulted in lower biases and root mean square errors of predictions than those of Pothier and Savard (1998), for stands dominated by balsam fir and, to a lesser extent, by black spruce. This can be explained by the introduction of a spruce budworm defoliation index in NATURA-2009 and by the taking into account of regional growth disparities. However, in the case of stands dominated by non-host species of spruce budworm, NATURA-2009 and Pothier and Savard (1998) produced similar results in terms of precision and bias. Consequently, we recommend the use of NATURA-2009 to improve the precision of future allowable cut calculations for stands dominated by balsam fir as well as white, red and black spruces, which cover a large proportion of the Québec forested area. NATURA-2009 is integrated into the CAPSIS 4.2.1 platform. A copy of this simulator is available upon request at the following address:* recherche.forestiere@mrnf.gouv.qc.ca.

Key words : growth model, empirical model, dynamic model, yield table, balsam fir, black spruce, spruce budworm, precision, bias, simulation, forest growth and yield

Table des matières

page

Résumé v

Abstract vii

Liste des tableaux xi

Liste des figures xiii

Liste des annexes xv

Introduction 1

Chapitre premier – Matériel et méthode 3

1.1 Peuplements échantillonnés et mesures récoltées 3

1.2 Regroupement des espèces 4

1.3 Variables calculées 4

1.3.1 Correction de l'âge 4

1.3.2 Hauteur dominante 4

1.3.3 Tarif de cubage 6

1.3.4 Densité du peuplement, diversité diamétrale et diversité de la composition 6

1.3.5 Indice de réduction de la croissance due à la tordeuse des bourgeons de l'épinette 7

1.3.6 Variables environnementales 7

1.4 Modèle de croissance 8

1.4.1 Hauteur dominante 8

1.4.2 Indice de régularité de Shannon 9

1.4.3 Nombre de tiges, surface terrière et volume marchand par groupe d'espèces 10

1.5 Évaluation du modèle global 11

Chapitre deux – Résultats 13

2.1 Calcul de la hauteur dominante 13

2.2 Changements temporels de la hauteur dominante 13

2.3 Changements temporels de l'indice de régularité de Shannon 14

2.4 Changements temporels du nombre de tiges, de la surface terrière et du volume marchand 14

2.5 Évaluation du modèle global 15

2.5.1 Évaluation en l'absence de coupe 15

2.5.2 Évaluation après coupe partielle 24

2.6 Fonctionnement du modèle 24

2.7 Exemples de simulation 26

Chapitre trois – Discussion 29

3.1 Comparaison avec le modèle de Pothier et Savard (1998) 29

3.2 Limites d'utilisation du modèle 32

Conclusion 35

Références bibliographiques 37

Annexes 39

Liste des tableaux

page

Tableau 1. Distribution des placettes selon leur nombre de segments d'évolution 3

Tableau 2. Principales caractéristiques dendrométriques mesurées au début des segments d'évolution des placettes retenues pour étalonner le modèle 5

Tableau 3. Valeurs estimées des paramètres (erreur-type entre parenthèses) des équations [3] à [9] utilisées pour prédire les changements temporels de la hauteur dominante 13

Tableau 4. Valeurs estimées des paramètres (erreur-type entre parenthèses) de l'équation [10] utilisée pour prédire les changements temporels de l'indice de régularité de Shannon 14

Tableau 5. Variables explicatives, paramètre d'autocorrélation (ρ) et erreur résiduelle estimée ($\hat{\sigma}$) des équations pour prédire les changements temporels du nombre de tiges marchandes (*N*, $\hat{\sigma}$ en tiges·400 m^{-2}) et de la surface terrière marchande (*St*, $\hat{\sigma}$ en $m^2 \cdot ha^{-1}$) des différents groupes d'espèces 15

Tableau 6. Biais moyen, racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (REQM), coefficient de détermination (R^2) et coefficient de concordance (CC) pour la hauteur dominante (m) dans les placettes n'ayant pas fait l'objet de coupe, en fonction du sous-domaine bioclimatique et de l'horizon de simulation 16

Tableau 7. Biais moyen, racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (REQM), coefficient de détermination (R^2) et coefficient de concordance (CC) pour l'indice de régularité de Shannon dans les placettes n'ayant pas fait l'objet de coupe, en fonction du sous-domaine bioclimatique et de l'horizon de simulation 17

Tableau 8. Biais moyen, racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (REQM), coefficient de détermination (R^2) et coefficient de concordance (CC) pour le nombre total de tiges marchandes (tiges·ha^{-1}) dans les placettes n'ayant pas fait l'objet de coupe, en fonction du sous-domaine bioclimatique et de l'horizon de simulation 19

Tableau 9. Biais moyen, racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (REQM), coefficient de détermination (R^2) et coefficient de concordance (CC) pour le diamètre moyen quadratique (cm) dans les placettes n'ayant pas fait l'objet de coupe, en fonction du sous-domaine bioclimatique et de l'horizon de simulation 20

Tableau 10. Biais moyen, racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (REQM), coefficient de détermination (R^2) et coefficient de concordance (CC) pour la surface terrière marchande totale ($m^2 \cdot ha^{-1}$) dans les placettes n'ayant pas fait l'objet de coupe, en fonction du sous-domaine bioclimatique et de l'horizon de simulation 21

Tableau 11. Biais moyen, racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (REQM), coefficient de détermination (R^2) et coefficient de concordance (CC) pour le volume marchand total ($m^3 \cdot ha^{-1}$) dans les placettes n'ayant pas fait l'objet de coupe, en fonction du sous-domaine bioclimatique et de l'horizon de simulation 22

Tableau 12. Biais moyen pour la surface terrière marchande ($m^2 \cdot ha^{-1}$), le volume marchand ($m^3 \cdot ha^{-1}$), le nombre de tiges marchandes (tiges·ha^{-1}) et le diamètre moyen quadratique (cm) dans les placettes n'ayant pas fait l'objet de coupe, en fonction du groupe d'espèces et de la proportion en surface terrière du groupe d'espèces 23

Tableau 13. Biais moyen, racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (REQM), coefficient de détermination (R^2) et coefficient de concordance (CC) pour la hauteur dominante (m) et l'indice de régularité de Shannon dans les placettes ayant fait l'objet de coupe partielle, en fonction du sous-domaine bioclimatique et de l'horizon de simulation 24

Tableau 14. Biais moyen, racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (REQM), coefficient de détermination (R^2) et coefficient de concordance (CC) pour la surface terrière marchande totale ($m^2 \cdot ha^{-1}$), le volume marchand total ($m^3 \cdot ha^{-1}$), le nombre total de tiges marchandes ($tiges \cdot ha^{-1}$) et le diamètre moyen quadratique (cm) dans les placettes ayant fait l'objet de coupe partielle, en fonction du sous-domaine bioclimatique et de l'horizon de simulation 25

Tableau 15. Équivalence entre les valeurs de l'indice de réduction de croissance due à la tordeuse des bourgeons de l'épinette et le nombre d'années avec défoliations sévères sur une période de 10 ans 27

Tableau 16. Biais annuel moyen ($m^3 \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$) et racine carrée de l'erreur quadratique annuelle moyenne (REQM, $m^3 \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$) pour la production annuelle prédite avec les modèles de Pothier-Savard (1998; P&S) et Natura, dans les placettes en peuplement pur n'ayant pas fait l'objet de coupe, en fonction de l'espèce, du sous-domaine bioclimatique, de l'indice de réduction de croissance due à la tordeuse des bourgeons de l'épinette (TBE) et de l'horizon de simulation 30

Tableau 17. Biais annuel moyen ($m^3 \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$) et racine carrée de l'erreur quadratique annuelle moyenne (REQM, $m^3 \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$) pour la production annuelle prédite avec les modèles de Pothier-Savard (1998; P&S) et Natura, dans les placettes en peuplement mixte n'ayant pas fait l'objet de coupe, en fonction du mélange d'espèces, du sous-domaine bioclimatique et de l'horizon de simulation 31

Liste des figures

page

Figure 1. Quatre simulations stochastiques illustrant l'évolution du volume marchand total de deux placettes, en l'absence et en présence de défoliation causée par la tordeuse des bourgeons de l'épinette 27

Liste des annexes

page

Annexe 1. Liste des espèces dans chacun des groupes d'espèces et leur nombre de tiges 39

Annexe 2. Principales caractéristiques dendrométriques mesurées au début des segments d'évolution des placettes retenues pour étalonner le modèle, par sous-domaine bioclimatique 40

Annexe 3. Équations de prévision du changement temporel du nombre de tiges marchandes, et valeurs estimées des paramètres 43

Annexe 4. Équations de prévision du changement temporel de la surface terrière marchande, et valeurs estimées des paramètres 46

Annexe 5. Équations de prévision du changement temporel du volume marchand, et valeurs estimées des paramètres 49

Annexe 6. Biais moyen pour le nombre de tiges marchandes par groupe d'espèces en fonction du sous-domaine bioclimatique et de l'horizon de simulation, dans les placettes n'ayant pas fait l'objet de coupe 52

Annexe 7. Biais moyen pour le diamètre moyen quadratique par groupe d'espèces en fonction du sous-domaine bioclimatique et de l'horizon de simulation, dans les placettes n'ayant pas fait l'objet de coupe 53

Annexe 8. Biais moyen pour la surface terrière marchande par groupe d'espèces en fonction du sous-domaine bioclimatique et de l'horizon de simulation, dans les placettes n'ayant pas fait l'objet de coupe 54

Annexe 9. Biais moyen pour le volume marchand par groupe d'espèces en fonction du sous-domaine bioclimatique et de l'horizon de simulation, dans les placettes n'ayant pas fait l'objet de coupe 55

Annexe 10. Biais moyen pour la surface terrière marchande (*St*, $m^2 \cdot ha^{-1}$), le volume marchand (*V*, $m^3 \cdot ha^{-1}$), le nombre de tiges marchandes (*N*, tiges·ha^{-1}) et le diamètre moyen quadratique (*Dq*, cm), en fonction du sous-domaine bioclimatique, de l'horizon de simulation et du groupe d'espèces, dans les placettes ayant fait l'objet de coupe partielle .. 56

Introduction

Les modèles empiriques de production forestière sont souvent utilisés parce qu'ils ont pour fondement les observations de nombreuses placettes d'inventaire qui, jumelées à une formulation mathématique adéquate, leur procurent des qualités recherchées par les praticiens (Mäkelä *et al.* 2000, Landsberg 2003). Ils sont notamment robustes, c'est-à-dire que leurs prévisions sont cohérentes, même près des valeurs limites des variables explicatives. Cet avantage est souvent présent même si les équations formant ces modèles sont relativement simples, comme dans le cas des modèles empiriques à l'échelle du peuplement. Au Québec, ce type de modèle a été utilisé pour déterminer le volume de bois sur pied à différentes périodes (Pothier et Savard 1998) et ainsi, déterminer l'approvisionnement annuel des usines de transformation du bois. Cet exercice est généralement désigné comme le calcul de la possibilité forestière et effectué sur de grands territoires et selon un long horizon temporel. Il est donc important qu'il soit réalisé sans biais, c'est-à-dire en l'absence de prévisions systématiquement erronées de façon positive ou négative, et avec une précision appropriée, c'est-à-dire que la dispersion des prévisions autour de leur moyenne soit la plus restreinte possible.

Puisque l'approvisionnement des usines de transformation peut jouer un rôle très important dans l'activité socio-économique de plusieurs régions québécoises, la précision des modèles utilisés pour le calcul de la possibilité forestière doit faire l'objet d'une préoccupation particulière. Au cours des dernières décennies, celle-ci a été améliorée en tirant profit de la quantité croissante d'informations dérivées des placettes d'inventaire. Ainsi, le modèle empirique de Boudoux (1978), qui n'a bénéficié que d'une partie du premier inventaire forestier décennal québécois, a cédé sa place à celui de Pothier et Savard (1998) qui a utilisé, pour son étalonnage, l'information tirée des deux premiers inventaires forestiers décennaux et d'une partie du troisième. Malgré l'amélioration de la précision et du biais apportée par le modèle de Pothier et Savard (1998), celui-ci comporte des lacunes, dont les principales concernent les placettes utilisées pour son étalonnage : 1) l'utilisation de placettes-échantillons temporaires en font un modèle statique, pour lequel l'accroissement en volume doit être déduit de valeurs calculées à partir de placettes indépendantes; 2) les placettes étaient toutes établies dans des peuplements purs, ce qui rend hasardeux la projection du volume de peuplements mixtes, alors que ceux-ci représentent pourtant les deux-tiers de la superficie forestière québécoise; 3) les placettes ont été fortement touchées par l'épidémie de tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana* [Clemens], ci-après nommée TBE) des années 1970 et 1980, ce qui pourrait mener à une sous-estimation de la production des peuplements dominés par le sapin baumier et, dans une moindre mesure, par les épinettes blanche, rouge et noire; et 4) les placettes de l'ensemble du territoire forestier québécois n'ont formé qu'un seul groupe, alors que les changements temporels de production forestière pourraient être différents d'une région à une autre, notamment en ce qui concerne le déclin du volume à un âge avancé (MRNFP 2004).

Pour combler ces lacunes, l'exploitation de l'information issue du réseau de placettes-échantillons permanentes (PEP) du ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec (MRNF) semble appropriée, d'autant plus que le suivi de ce réseau couvre maintenant une période de 35 ans. Ainsi, les mesures répétées de ces PEP permettraient de calculer directement l'accroissement de la production en volume marchand, d'estimer les changements temporels de composition forestière en tenant compte de la dynamique des espèces en présence, de mesurer le volume de bois mort pendant des périodes où le degré de défoliation par les insectes est connu, et de tester rigoureusement d'éventuelles différences régionales aux différents stades de développement des peuplements. En conséquence, le MRNF a entrepris de mettre à jour les modèles de production forestière du Québec, dans l'optique d'améliorer la précision des calculs de la possibilité forestière. Le présent document traite uniquement du modèle de prévision de la production forestière à l'échelle du peuplement, qui constitue un élément d'une gamme de modèles complétée par un modèle à l'échelle de l'arbre (Fortin et Langevin 2010), un modèle de succession (Saucier *et al.* en préparation) et un modèle à l'échelle du peuplement dédié uniquement aux plantations (Prégent *et al.* 2010).

Chapitre premier

Matériel et méthode

1.1 Peuplements échantillonnés et mesures récoltées

Les peuplements échantillonnés pour cette étude ont été sélectionnés à partir du réseau de placettes-échantillons permanentes (PEP) établi et suivi par le MRNF depuis les années 1970. Au début de ce projet, 12 001 PEP étaient disponibles dans le réseau, chacune ayant été mesurée entre une et six fois, pour un total de 34 546 mesures. Pour étalonner le modèle de croissance à l'échelle du peuplement avec des segments d'évolution créés à partir de deux mesurages successifs, au moins deux mesures étaient nécessaires afin d'utiliser une placette pour la modélisation. Le nombre de PEP répondant à ce critère était de 10 860, pour un total de 33 405 mesures et 22 545 segments d'évolution. Tous les mesurages touchés par une perturbation majeure (épidémie sévère, brûlis, chablis total, dépérissement total, coupe totale, friche, plantation) ont été éliminés du fichier de données, de même que tous les mesurages subséquents. Ces perturbations majeures ont été détectées à l'aide des notes de terrain. Si une perturbation majeure survenait lors du premier mesurage de la placette, tous les mesurages étaient conservés, sauf si la perturbation était suivie d'une plantation, auquel cas la placette était entièrement éliminée. Dans le cas des coupes totales, les notes de terrain étaient parfois manquantes et nous avons eu recours au pourcentage de surface terrière (ST) coupée pour améliorer leur détection. Lorsque le pourcentage de ST coupée était supérieur à 75 % de la ST marchande de la placette, les mesurages concernés et subséquents étaient éliminés. Les mesurages pour lesquels le pourcentage de ST coupée était inférieur à 75 % mais supérieur à 0 % ont aussi été éliminés. Toutefois, afin de vérifier l'effet des coupes partielles, les mesurages subséquents ont été conservés, mais consignés sous un nouveau numéro de placette. Les mesurages influencés par une perturbation naturelle légère (épidémie légère, chablis partiel, brûlis partiel, dépérissement partiel) ont été conservés. Les mesurages sans surface terrière marchande ont été éliminés puisque ce modèle ne vise pas à prédire la composition d'un peuplement après une perturbation majeure. Aucune restriction n'a été appliquée sur la composition en espèces de la placette. Ainsi, 8 011 placettes ont été utilisées pour la modélisation de la croissance à l'échelle du peuplement, pour un total de 20 885 mesures et 13 244 segments d'évolution (1 à 5 segments par placette). Le tableau 1 présente la distribution des placettes selon leur nombre de segments d'évolution.

Tableau 1. Distribution des placettes selon leur nombre de segments d'évolution (proportion entre parenthèses)

Nombre de segments d'évolution	Nombre de placettes	
1	4 177	(52 %)
2	2 521	(32 %)
3	1 228	(15 %)
4	84	(1 %)
5	1	(0 %)

Les PEP sont de forme circulaire et couvrent chacune une superficie de 400 m². À leur premier mesurage, tous les arbres dont le diamètre à hauteur de poitrine (DHP) était supérieur à 9,0 cm ont été numérotés. À chaque mesurage, l'inventaire des placettes consistait à noter le diamètre (à une précision de ± 1 mm) et l'état de chaque arbre numéroté, ainsi qu'à numéroter les arbres ayant atteint 9,1 cm de DHP depuis le dernier inventaire. De plus, une moyenne de 7 arbres (1 à 16), majoritairement dominants ou codominants, ont été sélectionnés selon un plan d'échantillonnage systématique dans chaque placette, pour déterminer leur hauteur (précision de ± 0,1 m) et leur âge à partir d'une barrette de sondage prélevée entre 0 et 1,3 m au-dessus du sol. L'inventaire consistait aussi à délimiter une sous-placette circulaire de 40 m² au centre de la PEP, pour y dénombrer le nombre de gaules (arbres dont le DHP est supérieur à 1,0 cm, mais inférieur à 9,1 cm) par classe de DHP de 2,0 cm et par espèce.

Puisque les prises de mesures et leur consignation sur support informatique n'est pas sans risque

d'erreur, une vérification des données a été effectuée par la Direction des inventaires forestiers du MRNF pour s'assurer de leur cohérence dans le temps. Dans un premier temps, cette vérification s'est attardée à détecter et corriger l'absence d'un mesurage, les mesurages en double, l'année et la date de mesurage. Dans un deuxième temps, l'état des arbres et les changements de cet état dans le temps ont été validés et corrigés au besoin. Ensuite, la détermination de l'espèce associée à chaque arbre numéroté a été validée, en posant l'hypothèse que l'espèce notée au dernier mesurage était sans erreur. Une validation a ensuite été effectuée du DHP des arbres et de la cohérence du changement de DHP au fil des mesurages. Les accroissements aberrants ont ainsi pu être détectés et le DHP problématique a été corrigé dans la mesure du possible. Ainsi, les faibles accroissements négatifs ont été ramenés à 0, en modifiant le DHP problématique. Les mesures de hauteur, d'accroissement en hauteur et d'âge des arbres échantillons ont aussi été validées. La hauteur des arbres a été validée à l'aide de relations hauteur-diamètre et corrigée, le cas échéant. Les accroissements en hauteur ont été validés de la même façon que les accroissements en DHP. La validation de l'âge consistait à identifier la valeur d'âge la plus fiable parmi les mesurages et de vérifier la cohérence des valeurs associées aux autres mesurages en utilisant l'intervalle de temps entre deux inventaires.

1.2 Regroupement des espèces

Pour que le présent modèle puisse s'appliquer aux peuplements mixtes, la dynamique de croissance des espèces en présence doit être prise en compte. Cependant, le grand nombre d'espèces d'arbres présentes dans une même placette complique l'étalonnage du modèle à l'échelle du peuplement, car celui-ci doit tenir compte de l'ensemble de ces espèces. Pour réduire le nombre d'espèces à considérer, nous avons décidé de les regrouper sur la base de leur autécologie, en tenant compte de leur appartenance aux groupes des gymnospermes et des angiospermes, de même que leur tolérance à l'ombre. Quatre groupes d'espèces ont ainsi été formés : les feuillus tolérants à l'ombre (Ft), les feuillus intolérants à l'ombre (Fi), les résineux tolérants à l'ombre (Rt) et les résineux intolérants à l'ombre (Ri). Par la suite, le sapin baumier a été retiré du groupe des Rt, en raison de sa vulnérabilité particulière à la TBE, pour former un cinquième groupe (Sab). La liste complète des espèces dans chacun des groupes est présentée à l'annexe 1.

Le tableau 2 présente les principales caractéristiques dendrométriques des placettes retenues pour étalonner le modèle. Les variables calculées présentées au tableau 2 sont décrites dans la section 1.3. Ces mêmes caractéristiques sont présentées par sous-domaine bioclimatique à l'annexe 2.

1.3 Variables calculées

1.3.1 Correction de l'âge

Les normes d'inventaire des PEP ont changé au fil des ans, de sorte que l'âge des arbres échantillons n'a pas toujours été mesuré à la même hauteur. Afin d'harmoniser le tout, la hauteur de mesure de l'âge des arbres a été corrigée à 1 m, à l'aide d'équations permettant d'estimer le temps requis pour que la hauteur d'un arbre passe de 0 à 1 m (Pothier et Savard 1998). Ces équations ont été utilisées pour les espèces suivantes : bouleau à papier, bouleau gris, épinette blanche, épinette noire, épinette rouge, peuplier faux-tremble, peuplier à grandes dents, peuplier à feuilles deltoïdes, pin gris, pin rigide, sapin baumier, mélèze laricin et thuya de l'est. Pour les autres espèces, le temps requis pour atteindre 1 m a été arbitrairement fixé à 5 ans. À partir de l'âge corrigé de chaque arbre échantillon, l'âge d'une placette a été déterminé par la moyenne de l'âge des arbres échantillons dominants et codominants, toutes espèces confondues. Cette méthode a été retenue parce que cette variable était toujours fortement significative dans les différents modèles testés, malgré la faible pertinence théorique d'un âge moyen calculé à partir d'arbres ne s'étant pas établis à la même période.

1.3.2 Hauteur dominante

La hauteur dominante d'un peuplement est définie par la hauteur moyenne des 100 plus gros arbres à l'hectare (Pardé et Bouchon 1988), ce qui correspond aux 4 plus gros arbres d'une placette de 0,04 ha ou 400 m^2. Dans la présente étude, cette définition de la hauteur dominante a été utilisée sans égard à l'espèce puisque pour des placettes à composition mixte, le calcul d'une hauteur dominante par espèce ou par groupe d'espèces produirait un très grand nombre de valeurs manquantes, ce qui mènerait à l'élimination de nombreuses placettes.

Dans une placette de 400 m^2, la hauteur dominante est donc définie par la hauteur moyenne des quatre arbres de la placette ayant les plus grands DHP, peu importe leur espèce. Toutefois, dans le réseau des PEP du MRNF, la hauteur des quatre plus

Tableau 2. Principales caractéristiques dendrométriques mesurées au début des segments d'évolution des placettes retenues pour étalonner le modèle (TBE : tordeuse des bourgeons de l'épinette, n : nombre de mesures, Fi : feuillus intolérants, Ft : feuillus tolérants, Ri : résineux intolérants, Rt : résineux tolérants, Sab : sapin baumier)

Variable	n	Moyenne	Écart-type	Minimum	Maximum
Temps entre 2 mesurages (années)	13 241	10,0	3,3	2,4	32,3
Hauteur dominante (m)	11 800	16,1	3,9	5,6	31,8
Âge moyen à 1 m des arbres codominants et dominants (années)	12 663	73	35	12	228
Indice de régularité de Shannon	13 244	0,73	0,16	0	1,06
Indice de réduction de croissance due à la TBE	13 244	0,7	1,0	0	5,1
Nombre de tiges marchandes (tiges·ha^{-1})					
Total	13 244	855	470	25	3 975
Fi	7 856	255	290	0	2 250
Ft	6 151	290	236	0	1 475
Ri	1 723	281	398	0	2 250
Rt	10 735	399	439	0	3 250
Sab	9 016	307	373	0	3 950
Surface terrière marchande (m^2·ha^{-1})					
Total	13 244	19,1	9,4	0,2	60,0
Fi	7 856	6,2	6,5	0	42,5
Ft	6 151	9,7	9,0	0	52,9
Ri	1 723	5,3	6,4	0	35,0
Rt	10 735	8,1	8,0	0	56,1
Sab	9 016	5,4	6,7	0	55,8
Volume marchand (m^3·ha^{-1})					
Total	13 125	110,6	72,0	0,2	520,7
Fi	7 808	39,5	47,5	0	440,0
Ft	6 079	66,6	72,3	0	470,8
Ri	1 699	31,9	43,0	0	321,9
Rt	10 648	42,6	47,5	0	424,9
Sab	8 954	25,7	35,1	0	290,8
Diamètre moyen quadratique (cm)					
Total	13 244	17,5	4,9	9,1	50,4
Fi	7 548	18,4	7,0	9,1	73,0
Ft	5 861	19,6	7,1	9,1	65,1
Ri	1 635	17,8	7,4	9,1	57,2
Rt	10 425	17,8	7,2	9,1	95,4
Sab	8 478	14,8	3,7	9,1	40,2

gros arbres n'est pas systématiquement mesurée, ce qui nous a obligés à estimer la hauteur dominante. Une première approche testée consistait à estimer la hauteur dominante par la moyenne de la hauteur prédite des quatre plus gros arbres, à l'aide d'équations mises au point par Fortin *et al.* (2009). Cependant, un jeu de données indépendant, dans lequel la hauteur de tous les arbres de chacune des placettes était mesurée, a permis de constater que cette approche était biaisée, particulièrement dans le cas des petites valeurs de hauteur dominante, qui étaient surestimées. Cette approche a donc été abandonnée. Ce même jeu de données a ensuite permis de tester une deuxième approche, basée sur celle utilisée par Pothier et Savard (1998), et qui s'est avérée non biaisée. Celle-ci consistait à estimer le coefficient de régression α_1 de l'équation [1] ci-dessous, proposée par Bégin et Raulier (1995) à partir d'un fichier composé uniquement des arbres échantillons de toutes les placettes :

$$H_{ijk} = 1.3 + \left[\frac{D_{ijk}}{\left(\frac{\overline{D}_{cd,ij}}{\overline{H}_{cd,ij} - 1.3} \right) + \alpha_1 (D_{ijk} - \overline{D}_{cd,ij})} \right] + \Psi_1 \rho^{\Delta t_{ij}} \varepsilon_{i(j-1)k} + \varepsilon_{ijk} \qquad [1]$$

où

H_{ijk} : hauteur totale de l'arbre échantillon k de la placette i au mesurage j (m)

D_{ijk} : diamètre à hauteur de poitrine (DHP) de l'arbre échantillon k de la placette i au mesurage j (cm)

$\overline{D}_{cd,ij}$: DHP moyen des arbres échantillons codominants et dominants, toutes espèces confondues, de la placette i au mesurage j (cm)

$\overline{H}_{cd,ij}$: hauteur totale moyenne des arbres échantillons codominants et dominants, toutes espèces confondues, de la placette i au mesurage j (m)

α_1 : coefficient de régression à estimer

Ψ_1 : variable indicatrice qui prend la valeur 0 si $j = 1$ et 1 si $j > 1$

ρ : paramètre d'autocorrélation entre deux mesurages successifs

Δt_{ij} : nombre d'années entre le mesurage j - 1 et j de la placette i, $j > 1$

$\varepsilon_{i(j-1)k}$: résidu de l'arbre échantillon k de la placette i au mesurage $j - 1$, $j > 1$

ε_{ijk} : erreur résiduelle, $\varepsilon_{ijk} \sim N(0, \sigma^2)$.

Par la suite, le coefficient α_1 de l'équation [1] a été utilisé pour estimer la hauteur dominante (*Hd*), en substituant à D_{ijk} une valeur de DHP égale au diamètre moyen des quatre plus gros arbres par placette, ce qui correspond aux 100 plus gros arbres à l'hectare. Dans le modèle de Pothier et Savard (1998), l'équation [1] avait été étalonnée indépendamment pour chacune des espèces. Toutefois, dans la présente étude, un seul paramètre α_1 de l'équation [1] a été calculé pour toutes les espèces confondues. Cette approche n'est pas sans problème, car lors de l'étalonnage de l'équation, les arbres échantillons ayant servi à calculer $\overline{H}_{cd,ij}$ étaient les mêmes que ceux utilisés pour la variable dépendante H_{ijk}. Malgré tout, cette approche a été conservée parce que les données disponibles ne permettaient pas de faire autrement et qu'une évaluation de l'approche à l'aide d'un jeu de données indépendant n'a révélé aucun biais.

1.3.3 Tarif de cubage

Le volume de chaque arbre vivant d'une placette a été estimé afin d'obtenir le volume marchand de chacun des groupes d'espèces de la placette. L'équation utilisée pour estimer le volume marchand d'un arbre est celle mise au point par Fortin *et al.* (2007). Cette équation utilise la hauteur de l'arbre, mais tous les arbres d'une placette n'avaient pas été mesurés lors de l'inventaire. Lorsque nécessaire, la hauteur de l'arbre a été estimée à l'aide d'une équation mise au point par Fortin *et al.* (2009). Même si cette équation biaisait légèrement la hauteur dominante des jeunes peuplements, elle produisait des résultats satisfaisants lorsque l'ensemble des arbres d'une placette était considéré.

1.3.4 Densité du peuplement, diversité diamétrale et diversité de la composition

La densité du peuplement correspond au nombre d'arbres marchands (DHP > 9,0 cm) dans les placettes, converti en nombre à l'hectare. Pour créer des variables tenant compte de la dynamique des espèces en présence, le rapport entre le nombre d'arbres de chaque groupe d'espèces et le nombre total d'arbres a été calculé pour les soumettre aux

équations de régression du modèle de croissance. Ce type de variable a aussi été calculé à partir de la surface terrière, du diamètre moyen quadratique et du volume. De plus, un indice de densité relative (REINEKE 1933) a été calculé selon deux méthodes présentées par SHAW et LONG (2007) : un premier indice, calculé en utilisant le diamètre moyen quadratique et un second, calculé en faisant la sommation des arbres individuels. Le rapport entre ces deux indices peut servir d'indicateur de déviation par rapport à une structure équienne (SHAW et LONG 2007) : plus le rapport s'éloigne de 1, plus le peuplement est de structure complexe.

Même si ces variables sont très utiles, elles ne peuvent fournir d'indications sur la structure diamétrale du peuplement qui, elle-même, peut nous renseigner sur sa structure d'âges et sur la dynamique de croissance entre les arbres. Pour cette raison, nous avons testé plusieurs indices représentant la structure diamétrale d'un peuplement : le coefficient de variation et le coefficient d'asymétrie des DHP, le coefficient de forme de l'équation de Weibull estimé par maximum de vraisemblance à partir de la distribution des DHP, le coefficient de Gini et l'indice de régularité de Shannon (LEXERØD et EID 2006). Les gaules n'ont été incluses dans aucun des calculs d'indices. Après avoir testé ces différents indices avec le fichier d'étalonnage, l'indice de régularité de Shannon (Équation [2]) s'est avéré le plus utile pour expliquer les variables de croissance. Il a été calculé de la façon suivante :

$$Sh = \frac{-\sum_{i=1}^{S} p_i \ln(p_i)}{\ln(S)} \qquad [2]$$

où

Sh : indice de régularité de Shannon

i : classe de DHP marchand de 2 cm (10, 12, 14...)

p_i : proportion de la surface terrière marchande dans la classe de DHP i

S : 95e percentile du nombre de classes de DHP de 2 cm observé dans une placette (13 classes)

ln : logarithme naturel.

Finalement, pour quantifier le degré de mélange des espèces arborescentes dans un même peuplement, l'indice de régularité de Shannon a aussi été utilisé pour estimer la diversité de la composition forestière. Ces calculs ont été faits en affectant la proportion de la surface terrière marchande de l'espèce i à la variable p_i de l'équation [2], et le 95e percentile du nombre d'espèces observé dans une placette (7 espèces) à la variable S.

1.3.5 Indice de réduction de la croissance due à la tordeuse des bourgeons de l'épinette

Par ses défoliations répétées en période épidémique, la TBE peut induire de la mortalité et des réductions de croissance en diamètre dans les peuplements composés de sapin baumier et des épinettes blanche, rouge et noire. Ces dommages doivent être pris en compte parce que la dernière épidémie de TBE, qui s'est étendue environ de 1970 à 1990, coïncide avec la première période de croissance captée par les nombreuses placettes-échantillons permanentes établies au cours des années 1970. Ainsi, au sein des placettes situées dans les peuplements composés des espèces hôtes de la TBE, une croissance parfois chaotique peut rendre difficile l'ajustement du modèle de croissance, en plus d'engendrer des projections qui sous-estiment la production.

Une solution à ce problème consiste à estimer les pertes de production des placettes pendant la période épidémique, de façon à projeter des croissances non biaisées pendant des périodes non épidémiques. Pour ce faire, nous avons utilisé l'équation développée par POTHIER *et al.* (2005), qui permet de prévoir les baisses de croissance en diamètre du sapin à partir uniquement des relevés de défoliation annuelle causée par les insectes, consignés annuellement par la Direction de l'environnement et de la protection des forêts du MRNF pour tout le territoire québécois. Cette équation a déjà servi pour construire un indice de réduction de la croissance, qui a ensuite été relié avec succès à la mortalité des sapins observée entre deux mesurages de placette (POTHIER et MAILLY 2006). Même si cet indice a été mis au point pour le sapin seulement, il a aussi été testé dans les équations pour les épinettes parce que les pertes anticipées pour ces espèces devraient être proportionnelles à celles du sapin, bien que moindres.

1.3.6 Variables environnementales

Plusieurs variables ont été testées dans le but d'améliorer la précision des équations de prévision et de permettre une régionalisation du modèle de croissance. Ces variables sont disponibles

pour toutes les placettes permanentes ou temporaires, puisqu'elles sont issues du système de classification écologique utilisé pour l'inventaire forestier québécois, ou encore, calculées par le logiciel BioSIM (Régnière *et al.* 1995, Régnière et Saint-Amand 2008) à partir de l'exposition, de la pente et des coordonnées latitudinale, longitudinale et altitudinale des placettes. Les variables liées au système de classification écologique sont le sous-domaine bioclimatique, la végétation potentielle et les classes de drainage et de texture du sol, alors que la température annuelle moyenne et les précipitations annuelles moyennes, sur la période 1971-2000, sont des exemples de variables issues de BioSIM.

1.4 Modèle de croissance

Un modèle de production forestière utilisé strictement pour le calcul de la possibilité forestière pourrait se contenter de prévoir uniquement les changements de volume marchand des espèces en fonction du temps. Cependant, pour permettre une utilisation davantage tactique (par exemple, la planification de récolte de certains peuplements ciblés), il devient nécessaire de projeter dans le temps des caractéristiques plus facilement mesurables que le volume marchand. Ainsi, les modèles de production forestière comportent généralement des équations permettant de prévoir les changements temporels de la hauteur dominante, du nombre d'arbres à l'hectare, de la surface terrière et, accessoirement, du diamètre moyen quadratique (Pothier et Savard 1998). Puisqu'une équation est nécessaire pour prévoir les changements temporels de chacune de ces variables d'intérêt, le présent modèle de production forestière est donc un système d'équations dont les principales caractéristiques sont décrites ci-après.

Plusieurs méthodes statistiques sont disponibles pour étalonner un système d'équations à partir des mesures répétées de placettes-échantillons permanentes, mesures qui ont la particularité d'être corrélées dans le temps pour une même placette. Certaines méthodes sont adaptées à des systèmes d'équations récursifs, c'est-à-dire qu'une variable prédite par une équation en amont du système, comme la hauteur dominante, est ensuite utilisée comme variable explicative dans une autre équation en aval du système, comme celle visant à prévoir le volume marchand. Toutefois, lorsque des équations distinctes par groupe d'espèces sont nécessaires, les systèmes d'équations récursifs ont des inconvénients qui rendent difficile l'estimation des paramètres à l'aide des logiciels statistiques disponibles (Gallant 1987). Dans ce cas, il faudrait n'utiliser que les placettes comprenant les cinq groupes d'espèces, ce qui réduirait la base de données à seulement quelques placettes.

Nous avons donc choisi d'utiliser trois systèmes d'équations non récursifs : un premier pour la prévision du nombre de tiges marchandes (*N*), un deuxième pour la prévision de la surface terrière (*St*) et un troisième pour la prévision du volume marchand (*V*). Chaque système est constitué de cinq équations, soit une pour chacun des groupes d'espèces. Toutefois, les équations pour la prévision de la hauteur dominante (*Hd*) et de l'indice de régularité de Shannon (*Sh*) ont été étalonnées individuellement. En effet, comme ces variables sont communes à l'ensemble des espèces d'une même placette, il était impossible de les insérer dans les systèmes d'équations par groupe d'espèces.

Comme la base de données était constituée de placettes-échantillons permanentes, soient des placettes avec plus d'un mesurage, nous avons comparé entre elles plusieurs formes d'équations de différence qui sont très performantes dans ces circonstances. Il s'agit d'équations dynamiques reliant une variable Y, mesurée au temps t_2, à diverses autres variables dont la même variable Y, mesurée, cette fois, au temps t_1 (Tomé *et al.* 2006). Nous avons notamment testé plusieurs fonctions non linéaires (par exemple : Chapman-Richards, quadratique inverse, combinaison d'une fonction exponentielle et de puissance) sous une forme d'équation de différence, parce que ces fonctions ont l'avantage de faire un lien direct entre croissance et production, tout en ayant une trajectoire temporelle invariable (*path invariant*, Woollons 1998). Une trajectoire invariable s'observe lorsque que les projections du temps t_0 à t_1 puis du temps t_1 à t_2 procurent le même estimé final qu'une seule projection faite du temps t_0 à t_2. Nous avons aussi testé des équations de différence linéaires, qui ont l'avantage d'être plus flexibles que les équations non linéaires.

1.4.1 Hauteur dominante

Pour modéliser les changements de hauteur dominante dans le temps, nous avons choisi une forme de modèle similaire à celle proposée par Ouzennou *et al.* (2008), qui correspond au modèle de Chapman-Richards sous la forme d'une équation de différence. Même si cette forme d'équation produit une asymptote à des âges avancés, elle s'est avérée la moins biaisée de toutes les formes d'équations testées. L'équation a été étalonnée

avec la procédure NLMIXED de SAS/STAT® (SAS INSTITUTE INC. 2004b), en spécifiant un effet aléatoire de placettes (Équation [3]) :

$$Hd_{2,ij} = 1 + \left(Hd_{1,ij} - 1\right) \times \left[\frac{1 - \exp\left(-\beta_1\left(A_{1,ij} + \Delta t_{ij}\right)\right)}{1 - \exp\left(-\beta_1 A_{1,ij}\right)}\right]^{\beta_2} + \delta_i + \varepsilon_{ij} \qquad [3]$$

où

$Hd_{2,ij}$: hauteur dominante de la placette *i* à la fin de l'intervalle *j* (m)

$Hd_{1,ij}$: hauteur dominante de la placette *i* au début de l'intervalle *j* (m)

$A_{1,ij}$: âge moyen des arbres codominants et dominants de la placette *i* au début de l'intervalle *j* (années)

Δt_{ij} : nombre d'années dans l'intervalle *j* de la placette *i*

δ_i : effet aléatoire de la placette *i*, $\delta_i \sim \mathrm{N}(0, \sigma_p^2)$

ε_{ij} : erreur résiduelle, $\varepsilon_{ij} \sim \mathrm{N}(0, \sigma^2)$

$$\beta_2 = b_1 \beta_1 \qquad [4]$$

$$\beta_1 = b_2 f_{\tilde{h}_{max}} f_{\Delta t} f_{Sh} \qquad [5]$$

avec

$$f_{\tilde{h}_{max}} = 1 + c_{\tilde{h}_{max}}\left(\frac{\tilde{h}_{max,ij} - \overline{\tilde{h}}_{max}}{\overline{\tilde{h}}_{max}}\right) \qquad [6]$$

$$f_{\Delta t} = 1 + c_{\Delta t}\left(\frac{\Delta t_{ij} - \overline{\Delta t}}{\overline{\Delta t}}\right) \qquad [7]$$

$$f_{Sh} = 1 + c_{Sh}\left(\frac{Sh_{ij} - \overline{Sh}}{\overline{Sh}}\right) \qquad [8]$$

$$\tilde{h}_{max,ij} = 1 + \left[\frac{\left(Hd_{1,ij} - 1\right)}{\left(1 - \exp\left(-b_2 A_{1,ij}\right)\right)^{b_2 b_1}}\right] \qquad [9]$$

où $\overline{\tilde{h}}_{max}$, $\overline{\Delta t}$ et $\overline{Sh}$ sont respectivement les moyennes des $\tilde{h}_{max,ij}$ (hauteur dominante asymptotique évaluée au début de l'intervalle *j* de la placette *i*), Δt_{ij} (nombre d'années dans l'intervalle *j* de la placette *i*) et Sh_{ij} (indice de régularité de Shannon au début de l'intervalle *j* de la placette *i*), et b_1, b_2, $c_{\tilde{h}_{max}}$, $c_{\Delta t}$ et c_{Sh} sont les paramètres à estimer. Les fonctions f des équations [6] à [8] permettent de moduler le paramètre β_1 en fonction de la hauteur dominante asymptotique ($\tilde{h}_{max}$), du nombre d'années dans l'intervalle (Δt) et de l'indice de régularité de Shannon (Sh). De plus amples détails sur les étapes de calcul des équations [3] à [9] sont disponibles dans OUZENNOU *et al.* (2008).

1.4.2 Indice de régularité de Shannon

Dans le cadre des calculs de la possibilité forestière, les variables de croissance sont souvent projetées sur de très longs horizons temporels. L'équation [3], utilisée pour projeter *Hd* dans le temps, inclut l'indice de régularité de Shannon. Des tests préliminaires ont montré que cet indice variait dans le temps. En conséquence, nous avons modélisé les changements temporels de *Sh* à l'aide d'une équation de différence linéaire, dans laquelle différentes variables explicatives ont été testées. L'équation [10] a été choisie en raison de sa simplicité et de sa capacité prédictive :

$$Sh_{2,ij} = \alpha_0 + \alpha_1 Sh_{1,ij} + \alpha_2 A_{1,ij} + \alpha_3 \Delta t_{ij} + \varepsilon_{ij} \qquad [10]$$

où

$Sh_{2,ij}$: indice de régularité de Shannon de la placette *i* à la fin de l'intervalle *j*

$Sh_{1,ij}$: indice de régularité de Shannon de la placette *i* au début de l'intervalle *j*

$A_{1,ij}$: âge moyen des arbres codominants et dominants de la placette *i* au début de l'intervalle *j* (années)

Δt_{ij} : nombre d'années dans l'intervalle *j* de la placette *i*

α_m : paramètres à estimer (*m* = 0 à 3)

ε_{ij} : erreur résiduelle, $\varepsilon_{ij} \sim \mathrm{N}(0, \sigma^2)$.

Cette équation a été étalonnée à l'aide de la procédure MIXED de SAS/STAT® (SAS Institute Inc. 2004b). Aucun effet aléatoire n'était significatif, ce qui était aussi le cas de la corrélation entre les observations d'une même placette.

1.4.3 Nombre de tiges, surface terrière et volume marchand par groupe d'espèces

Plusieurs formes d'équation ont été testées pour trouver celle qui alliait le mieux flexibilité, simplicité, exactitude et précision des résultats. Par exemple, il fallait que la forme de l'équation permette de modéliser le déclin du volume des peuplements qui survient généralement après l'atteinte d'une valeur maximale à un âge avancé. Cette considération a exclu les équations asymptotiques comme celle de Chapman-Richards. La forme finalement retenue est celle d'une équation de différence linéaire. Bien que cette forme ait l'inconvénient de ne pas avoir une trajectoire temporelle invariable, elle s'est avérée plus précise et moins biaisée que les fonctions non linéaires, tout en ayant une structure simple et flexible. La transformation logarithmique a été utilisée afin de respecter les postulats de normalité et d'homogénéité des variances. Cette transformation a aussi permis d'obtenir une meilleure adéquation et d'assurer des prévisions supérieures à zéro sur l'échelle originale. Le système d'équations pour une variable Y peut s'écrire comme suit :

$$\ln\left(YFi_{2,ij}\right) = a_1 + a_2 \ln\left(YFi_{1,ij}\right) + a_3 \Delta t_{ij} + a_4 \ln\left(NFi_{1,ij}\right) + \ldots + \varepsilon_{Fi,ij} \qquad [11]$$

$$\ln\left(YFt_{2,ij}\right) = b_1 + b_2 \ln\left(YFt_{1,ij}\right) + b_3 \Delta t_{ij} + b_4 \ln\left(NFt_{1,ij}\right) + \ldots + \varepsilon_{Ft,ij} \qquad [12]$$

$$\ln\left(YRi_{2,ij}\right) = c_1 + c_2 \ln\left(YRi_{1,ij}\right) + c_3 \Delta t_{ij} + c_4 \ln\left(NRi_{1,ij}\right) + \ldots + \varepsilon_{Ri,ij} \qquad [13]$$

$$\ln\left(YRt_{2,ij}\right) = d_1 + d_2 \ln\left(YRt_{1,ij}\right) + d_3 \Delta t_{ij} + d_4 \ln\left(NRt_{1,ij}\right) + \ldots + \varepsilon_{Rt,ij} \qquad [14]$$

$$\ln\left(YSab_{2,ij}\right) = e_1 + e_2 \ln\left(YSab_{1,ij}\right) + e_3 \Delta t_{ij} + e_4 \ln\left(NSab_{1,ij}\right) + \ldots + \varepsilon_{Sab,ij} \qquad [15]$$

où

$YFi_{2,ij}$, $YFt_{2,ij}$, $YRi_{2,ij}$, $YRt_{2,ij}$, $YSab_{2,ij}$:

variable dépendante Y pour les groupes d'espèces Fi, Ft, Ri, Rt et Sab, respectivement, mesurée sur la placette i à la fin de l'intervalle j

$YFi_{1,ij}$, $YFt_{1,ij}$, $YRi_{1,ij}$, $YRt_{1,ij}$, $YSab_{1,ij}$:

variable Y pour les groupes d'espèces Fi, Ft, Ri, Rt et Sab, respectivement, mesurée sur la placette i au début de l'intervalle j

Δt_{ij} :

nombre d'années dans l'intervalle j de la placette i

$NFi_{1,ij}$, $NFt_{1,ij}$, $NRi_{1,ij}$, $NRt_{1,ij}$, $NSab_{1,ij}$:

nombre de tiges marchandes des groupes d'espèces Fi, Ft, Ri, Rt et Sab, respectivement, mesuré sur la placette i au début de l'intervalle j (tiges·400 m^{-2})

a_m, b_m, c_m, d_m, e_m :

paramètres à estimer où m représente le numéro du paramètre dans l'équation

... :

autres variables explicatives significatives pour chaque équation

$\varepsilon_{Fi,ij}$, $\varepsilon_{Ft,ij}$, $\varepsilon_{Ri,ij}$, $\varepsilon_{Rt,ij}$, $\varepsilon_{Sab,ij}$:

erreurs résiduelles des équations [11] à [15] respectivement, $\varepsilon_{Fi,ij}$, $\varepsilon_{Ft,ij}$, $\varepsilon_{Ri,ij}$, $\varepsilon_{Rt,ij}$, $\varepsilon_{Sab,ij} \sim N_5(0, \Sigma)$ où Σ est la matrice de covariances des erreurs entre les équations.

Le nombre de tiges, la surface terrière et le volume sont exprimés respectivement en tiges par 400 m^2, en m^2·ha^{-1} et en m^3·ha^{-1}. Le nombre de tiges est exprimé à l'échelle de la placette, car les équations avaient une meilleure adéquation à cette échelle. L'étalonnage des équations n'était pas invariable à une transformation d'échelle, puisqu'elles n'étaient pas nécessairement hiérarchiques (l'inclusion d'une interaction entre deux variables ne nécessitait pas l'inclusion des deux variables individuelles).

Pour chaque variable dépendante (nombre de tiges marchandes, surface terrière marchande et volume marchand) et chaque groupe d'espèces (Fi, Ft, Ri, Rt et Sab), nous avons déterminé les

variables explicatives en les intégrant une à une dans les équations [11] à [15], et en conservant celles qui produisaient une augmentation du coefficient de détermination (R^2, déterminé à partir d'une validation croisée) supérieure à 0,5 %. Plusieurs combinaisons de variables explicatives ont ainsi été testées pour une même valeur de R^2; la combinaison sélectionnée était celle ayant le plus faible biais. Les variables ont été testées avec un seuil de signification de 5 %. Pour s'assurer qu'aucune variable explicative n'ait été oubliée, nous avons analysé des graphiques des résidus en fonction des variables explicatives non intégrées dans la combinaison finale de variables explicatives.

La méthode SUR (*Seemingly Unrelated Regression*) a été utilisée pour estimer les paramètres des équations [11] à [15] à l'aide de la procédure MODEL de SAS/ETS® (SAS INSTITUTE INC. 2004a). Cette méthode permet de tenir compte de la corrélation entre les erreurs des différentes équations du système et de la corrélation entre les mesures répétées d'une même placette. Dans ce dernier cas, le terme d'erreur a été modélisé avec une structure autorégressive continue de premier ordre [CAR(1)], qui permet de prendre en compte les observations inégalement espacées dans le temps (GREGOIRE *et al.* 1995). La structure CAR(1) déploie le terme d'erreur de la façon suivante (BARRIO ANTA *et al.* 2006) :

$$\varepsilon_{ij} = \psi_1 \rho^{\Delta t_{ij}} \varepsilon_{i(j-1)} + e_{ij} \qquad [16]$$

où

ε_{ij} : résidu de la placette i à la fin de l'intervalle j

ψ_1 : variable indicatrice de valeur 0 au premier intervalle et de valeur 1 pour les intervalles subséquents

ρ : paramètre d'autocorrélation entre deux intervalles successifs

Δt_{ij} : nombre d'années dans l'intervalle j de la placette i

$\varepsilon_{i(j-1)}$: résidu de la placette i à la fin de l'intervalle $j-1, j>1$

e_{ij} : erreur résiduelle de la placette i à la fin de l'intervalle j sous les conditions d'indépendance et d'homoscédasticité.

L'algorithme de Marquardt a été utilisé comme méthode d'optimisation, puisque qu'il est le plus performant lorsque les paramètres sont fortement corrélés (FANG et BAILEY 1998, PARRESOL 2001).

1.5 Évaluation du modèle global

Les différentes équations ont toutes été évaluées selon une approche de validation croisée (VANCLAY et SKOVSGAARD 1997). Avant l'étalonnage, les placettes ont été aléatoirement divisées en 10 groupes, ce qui a permis d'étalonner les équations 10 fois, en retirant un groupe différent à chaque occasion. De cette façon, les groupes pouvaient être considérés indépendants. Les caractéristiques du premier mesurage de chaque placette ont été utilisées pour représenter le peuplement initial. Les changements temporels de ces caractéristiques ont été modélisés en respectant les intervalles de temps écoulé entre deux mesurages de chaque placette. Les prévisions du groupe retiré ont été obtenues en utilisant l'équation étalonnée à partir des neuf autres groupes de placettes, puis ont été comparées aux valeurs observées. Par la suite, l'ensemble des placettes (c'est-à-dire les 10 groupes) a été utilisé pour étalonner la version finale de l'équation. Dans cet exercice, il faut noter qu'à chaque fois qu'une équation contenait une variable explicative prédite par une autre équation située en amont du modèle, la valeur prédite a été utilisée dans l'équation située en aval. Les statistiques calculées pour évaluer chaque équation sont le biais moyen, la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (REQM), un indice d'adéquation qui est l'équivalent du R^2 (VANCLAY et SKOVSGAARD 1997) et le coefficient CC (VONESH *et al.* 1996, HUANG *et al.* 2009) :

$$\text{biais} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m_i}\left(y_{ij} - \hat{y}_{ij}\right)}{\sum_{i=1}^{n} m_i} \qquad [17]$$

$$\text{REQM} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m_i}\left(y_{ij} - \hat{y}_{ij}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n} m_i}} \qquad [18]$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m_i}\left(y_{ij} - \hat{y}_{ij}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m_i}\left(y_{ij} - \bar{y}\right)^2} \quad [19]$$

$$CC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m_i}\left(y_{ij} - \hat{y}_{ij}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m_i}\left(y_{ij} - \bar{y}\right)^2 + \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m_i}\left(\hat{y}_{ij} - \bar{\hat{y}}\right)^2 + \sum_{i=1}^{n} m_i\left(\bar{y} - \bar{\hat{y}}\right)^2} \quad [20]$$

où y_{ij} est la valeur observée d'une variable à la fin de l'intervalle j de la placette i, $\hat{y}_{ij}$ est la valeur prédite de cette même variable à la fin de l'intervalle j de la placette i, $\bar{y}$ est la moyenne des y_{ij}, $\bar{\hat{y}}$ est la moyenne des $\hat{y}_{ij}$, m_i est le nombre d'intervalles de la placette i, et n est le nombre de placettes.

Des valeurs relatives du biais et de REQM ont été obtenues en les divisant par la moyenne des valeurs observées. Une valeur positive du biais indique que l'équation sous-estime les valeurs observées, alors qu'une valeur négative indique plutôt une surestimation. Le biais moyen est une mesure de l'exactitude qui correspond à l'erreur de l'ensemble des observations, tandis que REQM est une mesure de la précision qui correspond plutôt à l'erreur moyenne associée à une prévision individuelle (Vanclay et Skovsgaard 1997). De son côté, le R^2 fournit un indice de la capacité prédictive de l'équation : une valeur de 1 indique une adéquation parfaite entre les valeurs observées et prédites, alors qu'une valeur de 0 révèle que l'équation ne fait pas mieux qu'une simple moyenne (Vanclay et Skovsgaard 1997). Le coefficient CC, quant à lui, est une mesure combinée du degré d'exactitude et de précision évaluant la répartition des paires y_{ij} et $\hat{y}_{ij}$, sur la ligne à 45° passant par l'origine. Une valeur de CC égale à 1 correspond à une adéquation parfaite entre les valeurs observées et prédites, alors qu'une valeur de 0 indique un manque d'ajustement (Vonesh *et al.* 1996, Huang *et al.* 2009).

Les valeurs de biais moyen, REQM, R^2 et CC ont été calculés pour chaque équation, pour l'ensemble des espèces réunies et pour chaque groupe d'espèces, par sous-domaine bioclimatique et par mesurage. Le nombre d'années entre le premier et le deuxième mesurage, le premier et le troisième mesurage et le premier et le quatrième mesurage varie respectivement de 7 à 12 ans, de 16 à 25 ans et de 25 à 31 ans, selon le sous-domaine bioclimatique. Il est donc possible d'évaluer la performance des équations individuelles et du modèle global après 1, 2 et 3 pas de simulation, ce qui correspond approximativement à des horizons de 10, 20 et 30 ans, et ce, sur l'ensemble du territoire. Ces statistiques ont été calculées séparément pour les placettes n'ayant pas fait l'objet de coupe, de même que pour celles ayant fait l'objet de coupes partielles. Elles ont aussi été calculées par classe de proportion de la surface terrière telle que représentée par le groupe d'espèces dans la placette. Elles n'ont pas été calculées pour des groupes de moins de 30 observations.

Chapitre deux

Résultats

2.1 Calcul de la hauteur dominante

La hauteur dominante d'une placette a été déterminée à l'aide de l'équation [1], en estimant le paramètre α_1 pour l'ensemble des espèces présentes dans la placette. Puisque la valeur de ce paramètre a été estimée à 0,036192 ± 0,000084 ($\hat{\sigma}$ = 1,19 m), l'équation [21] permet de calculer la hauteur dominante de la placette *i* au mesurage *j* (Hd_{ij}), en utilisant le DHP des quatre plus gros arbres de la placette :

$$Hd_{ij} = 1{,}3 + \left[\frac{\bar{D}_{4,ij}}{\left(\frac{\bar{D}_{cd,ij}}{\bar{H}_{cd,ij} - 1{,}3} \right) + 0{,}036192 \times (\bar{D}_{4ij} - \bar{D}_{cd,ij})} \right] \quad [21]$$

où

$\bar{D}_{4,ij}$: DHP moyen des quatre plus gros arbres (toutes espèces confondues) de la placette *i* au mesurage *j* (cm),

$\bar{D}_{cd,ij}$: DHP moyen des arbres échantillons dominants et codominants de la placette *i* au mesurage *j* (cm),

$\bar{H}_{cd,ij}$: hauteur moyenne des arbres échantillons dominants et codominants de la placette *i* au mesurage *j* (m).

Il est à noter que le calcul de $\bar{D}_{cd,ij}$ et de $\bar{H}_{cd,ij}$ nécessite au moins deux arbres échantillons codominants ou dominants, et que le calcul de $\bar{D}_{4,ij}$ requiert au moins quatre arbres marchands dans la placette. Si l'une de ces conditions n'est pas respectée, la hauteur dominante ne peut être estimée.

2.2 Changements temporels de la hauteur dominante

Le changement temporel de la hauteur dominante a été estimé à l'aide des équations [3] à [9]. Afin d'éliminer des biais régionaux, l'équation a été étalonnée séparément pour chacun des sous-domaines bioclimatiques. Les valeurs des paramètres de l'équation sont présentées au tableau 3. L'erreur résiduelle a été estimée entre 0,08 et 0,27 m, selon le sous-domaine bioclimatique, tandis que l'erreur associée à la placette varie de 0,57 à 1,06 m.

Tableau 3. Valeurs estimées des paramètres (erreur-type entre parenthèses) des équations [3] à [9] utilisées pour prédire les changements temporels de la hauteur dominante ($\hat{\sigma}_p$: erreur de la placette, $\hat{\sigma}$: erreur résiduelle; voir la page 9 pour la définition des autres paramètres)

Sous-domaine	b_1	b_2	$c_{\bar{h}_{max}}$	$c_{\Delta t}$	c_{Sh}	$\overline{\bar{h}_{max}}$	$\overline{\Delta t}$	$\overline{Sh}$	$\hat{\sigma}_p$ (m)	$\hat{\sigma}$ (m)
1	63,20 (3,66)	0,078 (0,007)	1,492 (0,085)	-0,109 (0,062)	-0,775 (0,206)	23,61	9,83	0,80	0,90	0,24
2est	34,61 (2,26)	0,068 (0,011)	1,113 (0,177)	-1,038 (0,362)	-0,908 (0,482)	24,50	8,43	0,76	0,74	0,27
2ouest	63,20 (3,66)	0,078 (0,007)	1,492 (0,085)	-0,109 (0,062)	-0,775 (0,206)	23,61	9,83	0,80	0,90	0,24
3est	25,75 (1,49)	0,066 (0,015)	1,418 (0,109)	-0,009 (0,512)	-1,813 (0,798)	24,67	9,38	0,79	0,90	0,18
3ouest	41,92 (2,40)	0,071 (0,006)	1,475 (0,064)	-0,021 (0,090)	-1,093 (0,235)	23,69	9,85	0,81	1,01	0,15
4est	40,78 (2,43)	0,078 (0,006)	1,460 (0,076)	0,000 (0,135)	-1,245 (0,200)	20,86	9,10	0,76	0,81	0,19
4ouest	41,11 (3,38)	0,079 (0,006)	1,704 (0,064)	-0,302 (0,115)	-1,448 (0,221)	19,77	10,22	0,75	1,06	0,17
5est	44,65 (4,60)	0,074 (0,006)	1,654 (0,069)	0,427 (0,153)	-0,985 (0,202)	17,55	9,27	0,73	0,82	0,18
5ouest	56,85 (4,12)	0,065 (0,006)	1,839 (0,099)	0,022 (0,055)	-0,690 (0,140)	18,81	9,95	0,68	0,82	0,20
6est	74,23 (7,61)	0,036 (0,004)	2,136 (0,166)	-0,043 (0,066)	-0,763 (0,154)	14,60	11,87	0,68	0,76	0,08
6ouest	56,29 (5,16)	0,052 (0,005)	1,901 (0,116)	-0,118 (0,080)	-0,727 (0,120)	16,12	9,35	0,62	0,57	0,12

2.3 Changements temporels de l'indice de régularité de Shannon

Le changement temporel de l'indice de régularité de Shannon a été estimé à l'aide de l'équation [10]. Après des tests préliminaires, l'équation [10] a été étalonnée séparément pour chacun des sous-domaines bioclimatiques, afin d'éliminer des biais régionaux. Les valeurs des paramètres de l'équation [10], pour chaque sous-domaine bioclimatique, sont présentées au tableau 4. L'erreur résiduelle a été estimée à des valeurs entre 0,051 et 0,083, selon le sous-domaine bioclimatique.

2.4 Changements temporels du nombre de tiges, de la surface terrière et du volume marchand

Les changements temporels du nombre de tiges marchandes et de la surface terrière marchande des groupes d'espèces ont été estimés à l'aide des équations [11] à [15]. Le tableau 5 donne un aperçu des variables explicatives retenues dans ces équations, de même qu'une estimation de leur erreur résiduelle. Les équations détaillées montrant la valeur de leurs paramètres sont présentées aux annexes 3 et 4. Les variables présentes dans ces dix équations sont l'âge moyen des arbres codominants et dominants, le sous-domaine bioclimatique, le nombre d'années entre deux mesurages et le nombre de tiges marchandes du groupe d'espèces considéré. L'indice de réduction de croissance due à la TBE influence la croissance des groupes d'espèces Fi, Rt et Sab, tandis que l'occurrence de perturbations naturelles légères touche principalement les groupes Ri et Rt. Une variable indicatrice, signalant les cas où la surface terrière de l'épinette blanche, de l'épinette rouge, du thuya ou de la pruche représente plus de 50 % de la surface terrière totale de la placette, est incorporée dans l'équation de la surface terrière du groupe Rt, afin de tenir compte du rythme de croissance plus rapide de ces espèces, comparativement à celui de l'épinette noire, qui est l'espèce la plus représentée dans ce groupe. Une variable indicatrice est aussi incorporée dans l'équation de la surface terrière du groupe Ri, pour signaler les cas où la surface terrière du pin rouge représente plus de 20 % de la surface terrière totale de la placette. Les valeurs de l'erreur résiduelle les plus élevées sont obtenues pour le groupe Sab, tandis que les plus faibles le sont pour le groupe Ri. Les valeurs du paramètre d'autocorrélation ρ de l'équation [16] varient de 0,83 à 0,92.

Tableau 4. Valeurs estimées des paramètres (erreur-type entre parenthèses) de l'équation [10] utilisée pour prédire les changements temporels de l'indice de régularité de Shannon ($\hat{\sigma}$: erreur résiduelle; voir la page 9 pour la définition des autres paramètres)

Sous-domaine	α_0	α_1	α_2	α_3	$\hat{\sigma}$
1	0,2549 (0,0309)	0,7026 (0,0330)	-0,0008 (0,0002)	0,0067 (0,0015)	0,064
2est	0,3019 (0,0228)	0,6904 (0,0250)	-0,0008 (0,0002)	0,0018 (0,0016)	0,062
2ouest	0,3150 (0,0274)	0,6156 (0,0341)	-0,0002 (0,0002)	0,0036 (0,0011)	0,067
3est	0,2946 (0,0144)	0,6602 (0,0151)	-0,0005 (0,0001)	0,0037 (0,0009)	0,064
3ouest	0,2546 (0,0130)	0,7152 (0,0146)	-0,0004 (0,0001)	0,0020 (0,0004)	0,072
4est	0,2555 (0,0144)	0,7003 (0,0170)	-0,0006 (0,0001)	0,0052 (0,0008)	0,060
4ouest	0,2167 (0,0113)	0,6995 (0,0124)	-0,0004 (0,0001)	0,0052 (0,0005)	0,083
5est	0,2801 (0,0136)	0,7154 (0,0151)	-0,0006 (0,0001)	-0,0004 (0,0008)	0,068
5ouest	0,1997 (0,0103)	0,7864 (0,0130)	-0,0008 (0,0001)	0,0030 (0,0005)	0,065
6est	0,1123 (0,0080)	0,9014 (0,0084)	-0,0004 (0,0000)	0,0004 (0,0004)	0,053
6ouest	0,1045 (0,0080)	0,8746 (0,0090)	-0,0004 (0,0000)	0,0027 (0,0005)	0,051

Tableau 5. Variables explicatives, paramètre d'autocorrélation (ρ) et erreur résiduelle estimée ($\hat{\sigma}$) des équations pour prédire les changements temporels du nombre de tiges marchandes (*N*, $\hat{\sigma}$ en tiges·400 m^{-2}) et de la surface terrière marchande (*St*, $\hat{\sigma}$ en m^2·ha^{-1}) des différents groupes d'espèces (Fi : feuillus intolérants, Ft : feuillus tolérants, Ri : résineux intolérants, Rt : résineux tolérants, Sab : sapin baumier)

Variable	*N*					*St*				
	Fi	Ft	Ri	Rt	Sab	Fi	Ft	Ri	Rt	Sab
N_g	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
St_g						X	X	X	X	X
Hd	X	X	X	X	X			X	X	X
Âge	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Sd	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
$St_g/StTot$	X					X	X	X		X
Drai								X		
Δt	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
TBE	X			X	X	X			X	X
Perturb			X	X		X		X	X	
EPX									X	
PIR								X		
ρ	0,89	0,87	0,91	0,92	0,85	0,90	0,89	0,88	0,92	0,83
$\hat{\sigma}$	2,79	1,92	1,23	3,84	5,02	1,49	1,35	0,50	1,83	2,25

Note : N_g est le nombre de tiges marchandes du groupe d'espèces *g*, St_g est la surface terrière marchande du groupe d'espèces *g*, *Hd* est la hauteur dominante, *Âge* correspond à l'âge moyen des arbres codominants et dominants de la placette, *Sd* est le sous-domaine bioclimatique, $St_g/StTot$ représente le rapport entre la surface terrière marchande du groupe d'espèces *g* et la surface terrière marchande totale, *Drai* est la classe de drainage, Δt correspond au nombre d'années dans l'intervalle, *TBE* représente l'indice de réduction de la croissance due à la tordeuse des bourgeons de l'épinette, *Perturb* est l'occurrence d'une perturbation naturelle légère dans l'intervalle, *EPX* est une variable indicatrice, signalant que la surface terrière de l'épinette blanche, de l'épinette rouge, du thuya ou de la pruche représente plus de 50 % de la surface terrière totale de la placette et *PIR* est une variable indicatrice, signalant que la surface terrière du pin rouge représente plus de 20 % de la surface terrière totale de la placette.

De leur côté, les variables explicatives des équations de prévisions des changements temporels du volume marchand ne varient pas d'un groupe d'espèces à un autre. Cependant, puisque le nombre de tiges marchandes et la surface terrière marchande du groupe d'espèces mesurés à la fin de l'intervalle sont inclus dans ces équations, les variables explicatives varient indirectement d'un groupe d'espèces à un autre. Les autres variables incluses dans les équations de prévision des changements temporels du volume marchand sont le volume marchand du groupe d'espèces au début de l'intervalle, la hauteur dominante à la fin de l'intervalle, l'âge moyen de la placette au début de l'intervalle, le sous-domaine bioclimatique et le nombre d'années dans l'intervalle. Les valeurs de l'erreur résiduelle des cinq équations pour la prévision du volume marchand sont respectivement de 3,27, 2,51, 1,60, 4,95 et 1,84 m^3·ha^{-1}, pour les groupes d'espèces Fi, Ft, Ri, Rt et Sab. Pour ces mêmes espèces, les valeurs du paramètre d'autocorrélation ρ de l'équation [14] sont respectivement 0,98, 0,98, 0,96, 0,98 et 0,96. Les valeurs des paramètres de chacune de ces équations sont présentées à l'annexe 5.

2.5 Évaluation du modèle global

2.5.1 Évaluation en l'absence de coupe

Les tableaux 6 et 7 présentent les résultats de la validation croisée pour les prévisions de la hauteur dominante et de l'indice de régularité de Shannon, respectivement, en l'absence de coupe. Les biais associés à la prévision de *Hd* sont généralement inférieurs à 0,7 m en valeur absolue (≤ 3,5 %); ceux associés à *Sh* sont généralement inférieurs à 2 %. Peu importe le sous-domaine bioclimatique, la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (REQM) associée aux prévisions de *Hd* augmente avec l'horizon de simulation, passant de valeurs entre 0,9 et 1,5 m pour un horizon variant de 7 à 12 ans, à des valeurs entre 1,3 et 2,8 m pour un horizon variant de 25 à 31 ans. Pour les prévisions de *Sh*, les valeurs de REQM se situent entre 7 et 11 % pour un horizon variant de 7 à 12 ans, et entre 9 et 15 % pour un horizon variant de 25 à 31 ans. La précision des prévisions diminue donc à mesure que l'on s'éloigne du mesurage initial. Selon l'horizon de simulation et le sous-domaine bioclimatique, les coefficients de détermination (R^2)

Tableau 6. Biais moyen, racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (REQM), coefficient de détermination (R^2) et coefficient de concordance (CC) pour la hauteur dominante (m) dans les placettes n'ayant pas fait l'objet de coupe, en fonction du sous-domaine bioclimatique et de l'horizon de simulation (valeurs relatives entre parenthèses, n : nombre de placettes)

Sous-domaine	Horizon de simulation	Hauteur dominante				
		n	Biais	REQM	R^2	CC
1	7-12 ans	85	-0,1 (-0,7 %)	1,4 (7,2 %)	85 %	0,95
	16-25 ans	43	0,0 (0,0 %)	2,4 (11,4 %)	56 %	0,91
2est	7-12 ans	140	0,2 (0,9 %)	1,4 (7,6 %)	87 %	0,94
	16-25 ans	72	0,2 (1,1 %)	1,9 (9,9 %)	77 %	0,90
	25-31 ans	34	0,7 (3,5 %)	2,4 (11,8 %)	65 %	0,87
2ouest	7-12 ans	163	-0,1 (-0,5 %)	1,4 (7,4 %)	84 %	0,95
	16-25 ans	86	0,2 (0,8 %)	1,8 (8,9 %)	76 %	0,93
	25-31 ans	47	-0,4 (-2,0 %)	2,2 (10,9 %)	61 %	0,89
3est	7-12 ans	513	0,1 (0,7 %)	1,4 (7,9 %)	81 %	0,91
	16-25 ans	312	0,4 (1,9 %)	2,0 (10,4 %)	60 %	0,85
	25-31 ans	62	0,7 (3,3 %)	2,3 (11,4 %)	48 %	0,84
3ouest	7-12 ans	643	0,0 (-0,2 %)	1,5 (7,8 %)	76 %	0,94
	16-25 ans	392	0,2 (1,1 %)	2,2 (10,4 %)	53 %	0,90
	25-31 ans	242	0,0 (0,1 %)	2,6 (12,4 %)	38 %	0,87
4est	7-12 ans	400	0,0 (0,0 %)	1,3 (7,9 %)	83 %	0,91
	16-25 ans	146	-0,1 (-0,6 %)	1,9 (11,3 %)	61 %	0,78
	25-31 ans	73	-0,1 (-0,7 %)	2,2 (12,7 %)	53 %	0,75
4ouest	7-12 ans	1044	-0,3 (-1,5 %)	1,5 (8,6 %)	79 %	0,89
	16-25 ans	583	-0,1 (-0,4 %)	2,0 (11,1 %)	57 %	0,79
	25-31 ans	242	-0,1 (-0,7 %)	2,5 (13,8 %)	33 %	0,68
5est	7-12 ans	601	-0,2 (-1,1 %)	1,3 (9,1 %)	79 %	0,92
	16-25 ans	194	-0,4 (-2,3 %)	1,9 (12,8 %)	57 %	0,82
	25-31 ans	102	-0,3 (-2,1 %)	2,2 (14,5 %)	38 %	0,67
5ouest	7-12 ans	579	-0,1 (-0,9 %)	1,3 (7,9 %)	84 %	0,91
	16-25 ans	272	-0,6 (-3,5 %)	1,8 (10,8 %)	66 %	0,79
	25-31 ans	47	-1,5 (-9,4 %)	2,8 (17,3 %)	40 %	0,50
6est	7-12 ans	1147	0,0 (-0,3 %)	1,0 (7,2 %)	90 %	0,97
	16-25 ans	596	-0,1 (-0,7 %)	1,2 (9,0 %)	84 %	0,96
	25-31 ans	61	-0,1 (-0,8 %)	1,3 (9,6 %)	84 %	0,95
6ouest	7-12 ans	685	0,1 (0,5 %)	0,9 (6,0 %)	93 %	0,98
	16-25 ans	299	-0,1 (-0,5 %)	1,3 (8,5 %)	84 %	0,93
	25-31 ans	63	-0,4 (-3,1 %)	1,3 (9,6 %)	76 %	0,94

Tableau 7. Biais moyen, racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (REQM), coefficient de détermination (R^2) et coefficient de concordance (CC) pour l'indice de régularité de Shannon dans les placettes n'ayant pas fait l'objet de coupe, en fonction du sous-domaine bioclimatique et de l'horizon de simulation (valeurs relatives entre parenthèses, n : nombre de placettes)

Sous-domaine	Horizon de simulation	Indice de régularité de Shannon					
		n	Biais	REQM		R^2	CC
1	7-12 ans	92	0,00 (-0,4 %)	0,07	(8,4 %)	68 %	0,84
	16-25 ans	50	0,00 (0,4 %)	0,07	(8,4 %)	53 %	0,84
2est	7-12 ans	147	0,00 (0,0 %)	0,06	(8,1 %)	75 %	0,87
	16-25 ans	82	-0,01 (-1,1 %)	0,08	(9,3 %)	43 %	0,76
	25-31 ans	41	-0,02 (-2,4 %)	0,09	(11,6 %)	7 %	0,65
2ouest	7-12 ans	171	0,00 (-0,2 %)	0,07	(7,9 %)	59 %	0,85
	16-25 ans	94	-0,01 (-0,7 %)	0,08	(9,0 %)	25 %	0,79
	25-31 ans	60	-0,01 (-1,5 %)	0,08	(9,8 %)	14 %	0,79
3est	7-12 ans	538	0,00 (0,2 %)	0,06	(7,0 %)	71 %	0,88
	16-25 ans	339	0,00 (-0,1 %)	0,06	(7,5 %)	44 %	0,84
	25-31 ans	75	0,00 (-0,3 %)	0,08	(9,3 %)	10 %	0,79
3ouest	7-12 ans	736	-0,01 (-0,7 %)	0,06	(7,9 %)	62 %	0,82
	16-25 ans	499	-0,01 (-1,3 %)	0,08	(10,0 %)	34 %	0,71
	25-31 ans	36	0,01 (1,4 %)	0,07	(8,9 %)	19 %	0,66
4est	7-12 ans	412	0,00 (0,2 %)	0,06	(7,2 %)	73 %	0,87
	16-25 ans	157	-0,01 (-1,8 %)	0,08	(10,1 %)	43 %	0,71
	25-31 ans	81	-0,02 (-2,4 %)	0,09	(10,8 %)	17 %	0,67
4ouest	7-12 ans	1117	-0,01 (-1,3 %)	0,08	(10,9 %)	57 %	0,73
	16-25 ans	674	-0,01 (-1,1 %)	0,09	(11,6 %)	36 %	0,57
	25-31 ans	304	0,00 (0,1 %)	0,09	(11,6 %)	25 %	0,50
5est	7-12 ans	611	-0,01 (-0,8 %)	0,06	(8,5 %)	70 %	0,83
	16-25 ans	205	0,00 (-0,6 %)	0,08	(11,0 %)	51 %	0,66
	25-31 ans	109	0,01 (1,2 %)	0,08	(10,0 %)	42 %	0,63
5ouest	7-12 ans	591	0,00 (0,1 %)	0,06	(8,1 %)	85 %	0,92
	16-25 ans	286	-0,01 (-1,3 %)	0,08	(11,2 %)	57 %	0,74
	25-31 ans	51	-0,01 (-0,7 %)	0,11	(14,5 %)	19 %	0,49
6est	7-12 ans	1197	0,00 (0,1 %)	0,05	(7,2 %)	86 %	0,94
	16-25 ans	648	0,00 (-0,1 %)	0,07	(10,3 %)	73 %	0,88
	25-31 ans	69	-0,01 (-1,7 %)	0,07	(10,3 %)	76 %	0,87
6ouest	7-12 ans	705	0,00 (0,2 %)	0,05	(7,8 %)	90 %	0,97
	16-25 ans	318	-0,01 (-0,8 %)	0,07	(10,1 %)	79 %	0,91
	25-31 ans	71	-0,01 (-1,2 %)	0,07	(12,1 %)	75 %	0,93

varient de 33 à 93 % pour *Hd*, et de 7 à 90 % pour *Sh*. Quant aux valeurs de CC, elles varient de 0,50 à 0,98 pour *Hd*, et de 0,49 à 0,97 pour *Sh*.

Les résultats de la validation croisée des prévisions du nombre de tiges et du diamètre moyen quadratique sont présentés aux tableaux 8 et 9, respectivement. Les biais associés à la prévision de *N* sont généralement inférieurs à 45 tiges·ha^{-1} en valeur absolue (≤ 5,7 %), et ceux associés à la prévision de *Dq* sont inférieurs ou égaux à 0,8 cm en valeur absolue (≤ 4,1 %). Les valeurs de REQM associées aux prévisions de *N* augmentent avec l'horizon de simulation, passant de valeurs relatives entre 15 et 28 % pour un horizon variant de 7 à 12 ans, à des valeurs entre 23 et 45 % pour un horizon variant de 25 à 31 ans. Pour les prévisions de *Dq*, les valeurs relatives de REQM se situent entre 8 et 14 % pour un horizon variant de 7 à 12 ans, et entre 13 et 20 % pour un horizon variant de 25 à 31 ans. Selon l'horizon de simulation et le sous-domaine bioclimatique, les valeurs de R^2 pour *N* et *Dq* varient de 23 à 92 %, tandis que les valeurs de CC se situent entre 0,49 et 0,96.

Les résultats de la validation croisée des prévisions de la surface terrière et du volume sont présentés aux tableaux 10 et 11, respectivement. Les biais associés à la prévision de *St* sont généralement inférieurs à 0,9 m^2·ha^{-1} en valeur absolue (≤ 4 %); ceux associés à la prévision de *V* sont généralement inférieurs à 6,5 m^3·ha^{-1} en valeur absolue (≤ 3 %). Les valeurs de REQM associées aux prévisions de *St* augmentent avec l'horizon de simulation, passant de valeurs entre 2,4 et 5,0 m^2·ha^{-1} pour un horizon variant de 7 à 12 ans, à des valeurs entre 3,4 m et 9,6 m^2·ha^{-1} pour un horizon variant de 25 à 31 ans. Pour les prévisions de *V*, les valeurs de REQM se situent entre 17 et 32 m^3·ha^{-1} pour un horizon variant de 7 à 12 ans, et entre 24 et 66 m^3·ha^{-1} pour un horizon variant de 25 à 31 ans. Selon l'horizon de simulation et le sous-domaine bioclimatique, les valeurs de R^2 pour *St* et *V* varient de 19 à 93 %, alors que les valeurs de CC varient de 0,52 à 0,97.

Les biais associés aux prévisions des groupes d'espèces pour *N*, *Dq*, *St* et *V* sont présentés aux annexes 6 à 9. Les biais relatifs sont généralement plus élevés que ceux associés aux prévisions du total, puisque les valeurs observées sont souvent plus faibles pour les différents groupes d'espèces. En valeur absolue, ces biais sont généralement inférieurs ou égaux à 50 tiges·ha^{-1} pour *N*, 2,0 cm pour *Dq*, 2,0 m^2·ha^{-1} pour *St*, et 11,2 m^3·ha^{-1} pour *V*.

Le tableau 12 présente les biais associés aux prévisions de *St*, *V*, *N* et *Dq*, en fonction de chaque groupe d'espèces et de la proportion de la surface terrière totale qu'il représente. Ainsi, toutes proportions et groupes d'espèces confondus, les biais en valeur absolue pour un horizon moyen de 15 ans, sont inférieurs à 0,5 m^2·ha^{-1} pour la prévision de *St*, inférieurs à 5,3 m^3·ha^{-1} pour la prévision de *V*, inférieurs à 27 tiges·ha^{-1} pour celle de *N* et inférieurs à 1,7 cm pour celle de *Dq*. En particulier, lorsque la proportion est supérieure ou égale à 75 %, les biais relatifs sont inférieurs à 3 % pour les prévisions de *St*, *N* et *Dq* et inférieurs à 6 % pour la prévision de *V*. Pour les autres proportions de *St*, les biais relatifs sont généralement supérieurs à ces valeurs, à cause de valeurs observées plus faibles.

Tableau 8. Biais moyen, racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (REQM), coefficient de détermination (R^2) et coefficient de concordance (CC) pour le nombre total de tiges marchandes (tiges·ha^{-1}) dans les placettes n'ayant pas fait l'objet de coupe, en fonction du sous-domaine bioclimatique et de l'horizon de simulation (valeurs relatives entre parenthèses, n : nombre de placettes)

Sous-domaine	Horizon de simulation	Nombre total de tiges marchandes						
		n	Biais		REQM		R^2	CC
1	7-12 ans	85	-33	(-3,9 %)	241	(28,1 %)	66 %	0,81
	16-25 ans	43	-16	(-1,8 %)	323	(37,5 %)	23 %	0,49
2est	7-12 ans	140	27	(2,9 %)	194	(20,3 %)	83 %	0,91
	16-25 ans	75	-26	(-2,9 %)	221	(24,6 %)	73 %	0,85
	25-31 ans	36	-86	(-9,8 %)	303	(34,2 %)	48 %	0,67
2ouest	7-12 ans	163	10	(1,2 %)	186	(22,4 %)	67 %	0,84
	16-25 ans	83	3	(0,3 %)	240	(30,5 %)	54 %	0,76
	25-31 ans	55	1	(0,2 %)	237	(30,4 %)	58 %	0,79
3est	7-12 ans	516	21	(2,3 %)	184	(20,3 %)	81 %	0,90
	16-25 ans	310	-17	(-1,9 %)	265	(30,4 %)	57 %	0,76
	25-31 ans	65	-96	(-12,3 %)	241	(31,0 %)	64 %	0,79
3ouest	7-12 ans	645	-6	(-0,8 %)	136	(19,1 %)	82 %	0,93
	16-25 ans	399	3	(0,4 %)	197	(28,5 %)	59 %	0,86
	25-31 ans	262	16	(2,3 %)	223	(31,7 %)	41 %	0,79
4est	7-12 ans	401	36	(3,4 %)	251	(23,4 %)	75 %	0,87
	16-25 ans	145	-14	(-1,3 %)	356	(32,6 %)	58 %	0,79
	25-31 ans	72	-60	(-6,1 %)	422	(42,4 %)	30 %	0,56
4ouest	7-12 ans	1048	-19	(-2,4 %)	211	(27,1 %)	77 %	0,88
	16-25 ans	604	-10	(-1,3 %)	307	(38,7 %)	45 %	0,70
	25-31 ans	265	-40	(-5,1 %)	334	(42,3 %)	33 %	0,61
5est	7-12 ans	602	19	(1,6 %)	265	(22,4 %)	83 %	0,92
	16-25 ans	193	38	(3,3 %)	406	(35,3 %)	57 %	0,78
	25-31 ans	102	113	(9,4 %)	539	(44,7 %)	28 %	0,58
5ouest	7-12 ans	580	6	(0,6 %)	188	(19,4 %)	86 %	0,93
	16-25 ans	275	-25	(-2,6 %)	327	(34,1 %)	58 %	0,76
	25-31 ans	50	-26	(-3,3 %)	350	(43,8 %)	31 %	0,57
6est	7-12 ans	1147	14	(1,3 %)	176	(16,3 %)	88 %	0,94
	16-25 ans	598	-1	(-0,1 %)	274	(26,5 %)	71 %	0,85
	25-31 ans	61	-45	(-5,7 %)	185	(23,5 %)	78 %	0,88
6ouest	7-12 ans	687	2	(0,2 %)	143	(15,1 %)	92 %	0,96
	16-25 ans	300	20	(2,0 %)	279	(27,9 %)	75 %	0,86
	25-31 ans	64	30	(3,1 %)	305	(32,4 %)	68 %	0,81

Tableau 9. Biais moyen, racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (REQM), coefficient de détermination (R^2) et coefficient de concordance (CC) pour le diamètre moyen quadratique (cm) dans les placettes n'ayant pas fait l'objet de coupe, en fonction du sous-domaine bioclimatique et de l'horizon de simulation (valeurs relatives entre parenthèses, n : nombre de placettes)

Sous-domaine	Horizon de simulation	Diamètre moyen quadratique					
		n	Biais		REQM	R^2	CC
1	7-12 ans	89	0,4	(2,3 %)	2,8 (14,0 %)	75 %	0,88
	16-25 ans	54	0,8	(3,7 %)	4,0 (19,0 %)	59 %	0,81
2est	7-12 ans	151	0,0	(0,0 %)	2,2 (11,7 %)	86 %	0,92
	16-25 ans	86	0,5	(2,5 %)	2,8 (14,2 %)	80 %	0,89
	25-31 ans	42	0,8	(3,8 %)	3,2 (15,4 %)	68 %	0,85
2ouest	7-12 ans	164	-0,2	(-0,9 %)	1,7 (8,8 %)	81 %	0,92
	16-25 ans	89	0,5	(2,5 %)	2,6 (12,2 %)	69 %	0,89
	25-31 ans	58	-0,3	(-1,3 %)	2,8 (12,6 %)	64 %	0,90
3est	7-12 ans	514	-0,1	(-0,7 %)	2,2 (11,5 %)	77 %	0,89
	16-25 ans	341	-0,1	(-0,4 %)	3,0 (14,7 %)	58 %	0,83
	25-31 ans	77	0,7	(3,1 %)	3,4 (15,3 %)	47 %	0,84
3ouest	7-12 ans	721	-0,3	(-1,3 %)	2,8 (13,7 %)	69 %	0,88
	16-25 ans	505	0,2	(0,9 %)	3,7 (16,7 %)	54 %	0,85
	25-31 ans	333	-0,1	(-0,4 %)	4,1 (18,7 %)	41 %	0,81
4est	7-12 ans	410	0,1	(0,3 %)	1,8 (10,7 %)	78 %	0,87
	16-25 ans	157	0,5	(2,8 %)	3,0 (16,6 %)	51 %	0,69
	25-31 ans	80	0,8	(4,1 %)	3,6 (19,0 %)	37 %	0,59
4ouest	7-12 ans	1122	0,2	(1,0 %)	2,6 (14,3 %)	70 %	0,83
	16-25 ans	694	0,6	(3,3 %)	3,3 (17,6 %)	53 %	0,72
	25-31 ans	314	0,6	(3,2 %)	4,0 (20,3 %)	39 %	0,65
5est	7-12 ans	607	0,0	(-0,3 %)	1,8 (10,8 %)	76 %	0,88
	16-25 ans	206	0,0	(-0,1 %)	2,6 (15,7 %)	42 %	0,69
	25-31 ans	113	0,1	(0,4 %)	3,0 (17,5 %)	29 %	0,56
5ouest	7-12 ans	582	0,1	(0,3 %)	1,5 (9,2 %)	84 %	0,93
	16-25 ans	291	0,3	(1,6 %)	2,6 (15,2 %)	59 %	0,75
	25-31 ans	54	0,3	(1,7 %)	3,4 (19,2 %)	54 %	0,62
6est	7-12 ans	1201	0,0	(0,1 %)	1,2 (8,3 %)	79 %	0,95
	16-25 ans	654	0,0	(-0,1 %)	1,7 (11,8 %)	61 %	0,91
	25-31 ans	69	0,2	(1,2 %)	2,4 (16,0 %)	36 %	0,82
6ouest	7-12 ans	705	0,1	(0,7 %)	1,3 (8,8 %)	84 %	0,96
	16-25 ans	322	0,0	(0,1 %)	2,0 (12,9 %)	71 %	0,90
	25-31 ans	74	-0,1	(-0,6 %)	1,8 (13,0 %)	55 %	0,93

Tableau 10. Biais moyen, racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (REQM), coefficient de détermination (R^2) et coefficient de concordance (CC) pour la surface terrière marchande totale ($m^2 \cdot ha^{-1}$) dans les placettes n'ayant pas fait l'objet de coupe, en fonction du sous-domaine bioclimatique et de l'horizon de simulation (valeurs relatives entre parenthèses, n : nombre de placettes)

Sous-domaine	Horizon de simulation	Surface terrière marchande				
		n	Biais	REQM	R^2	CC
1	7-12 ans	78	-0,5 (-2,0 %)	3,7 (15,6 %)	88 %	0,94
	16-25 ans	43	0,5 (1,9 %)	5,4 (20,5 %)	68 %	0,87
2est	7-12 ans	140	0,3 (1,4 %)	3,2 (13,8 %)	90 %	0,95
	16-25 ans	75	0,1 (0,3 %)	4,9 (19,7 %)	68 %	0,86
	25-31 ans	36	-0,7 (-2,5 %)	7,3 (26,3 %)	31 %	0,76
2ouest	7-12 ans	158	-0,5 (-2,3 %)	3,8 (15,7 %)	86 %	0,93
	16-25 ans	83	0,2 (0,9 %)	5,0 (19,7 %)	69 %	0,87
	25-31 ans	55	-0,7 (-2,4 %)	5,9 (21,4 %)	67 %	0,88
3est	7-12 ans	483	0,4 (1,6 %)	3,4 (14,2 %)	84 %	0,92
	16-25 ans	310	-0,5 (-2,1 %)	5,6 (21,6 %)	55 %	0,82
	25-31 ans	65	-0,8 (-2,8 %)	5,4 (19,8 %)	33 %	0,82
3ouest	7-12 ans	615	-0,5 (-2,3 %)	3,3 (14,6 %)	86 %	0,92
	16-25 ans	399	0,0 (-0,1 %)	5,1 (20,9 %)	62 %	0,82
	25-31 ans	262	-0,2 (-0,8 %)	6,1 (24,4 %)	47 %	0,76
4est	7-12 ans	398	0,4 (1,7 %)	4,1 (17,2 %)	84 %	0,92
	16-25 ans	145	-0,6 (-2,4 %)	7,1 (28,3 %)	59 %	0,80
	25-31 ans	72	-1,9 (-7,9 %)	9,6 (39,1 %)	19 %	0,55
4ouest	7-12 ans	1032	-0,6 (-3,3 %)	4,0 (22,1 %)	77 %	0,88
	16-25 ans	604	0,2 (1,1 %)	5,5 (27,5 %)	52 %	0,72
	25-31 ans	265	0,0 (-0,2 %)	6,4 (30,2 %)	40 %	0,62
5est	7-12 ans	594	-0,1 (-0,5 %)	5,0 (21,8 %)	77 %	0,88
	16-25 ans	193	0,6 (2,7 %)	6,9 (30,8 %)	53 %	0,72
	25-31 ans	102	1,9 (7,7 %)	9,1 (36,8 %)	27 %	0,54
5ouest	7-12 ans	566	0,0 (-0,1 %)	2,8 (15,7 %)	89 %	0,95
	16-25 ans	275	-0,8 (-4,0 %)	5,0 (25,0 %)	69 %	0,82
	25-31 ans	50	-1,3 (-7,5 %)	5,8 (34,4 %)	44 %	0,70
6est	7-12 ans	1145	0,4 (2,2 %)	2,9 (15,8 %)	90 %	0,95
	16-25 ans	598	0,3 (1,6 %)	4,0 (22,9 %)	82 %	0,91
	25-31 ans	61	0,1 (0,5 %)	3,4 (23,1 %)	88 %	0,95
6ouest	7-12 ans	683	0,2 (1,0 %)	2,4 (15,4 %)	93 %	0,97
	16-25 ans	300	0,2 (0,9 %)	4,1 (23,3 %)	81 %	0,91
	25-31 ans	64	0,1 (0,8 %)	3,8 (27,9 %)	77 %	0,93

Tableau 11. Biais moyen, racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (REQM), coefficient de détermination (R^2) et coefficient de concordance (CC) pour le volume marchand total ($m^3 \cdot ha^{-1}$) dans les placettes n'ayant pas fait l'objet de coupe, en fonction du sous-domaine bioclimatique et de l'horizon de simulation (valeurs relatives entre parenthèses, n : nombre de placettes)

Sous-domaine	Horizon de simulation	Volume marchand						
		n	Biais		REQM		R^2	CC
1	7-12 ans	78	-3,2	(-1,9 %)	26,6	(15,9 %)	93 %	0,97
	16-25 ans	42	6,5	(3,3 %)	45,0	(23,1 %)	76 %	0,92
2est	7-12 ans	140	1,6	(1,1 %)	22,1	(15,7 %)	92 %	0,96
	16-25 ans	75	4,5	(2,8 %)	37,4	(23,2 %)	78 %	0,90
	25-31 ans	36	1,6	(0,9 %)	57,6	(31,4 %)	40 %	0,79
2ouest	7-12 ans	158	-4,1	(-2,5 %)	27,1	(16,9 %)	88 %	0,95
	16-25 ans	83	3,7	(2,1 %)	39,2	(21,8 %)	70 %	0,90
	25-31 ans	55	-3,7	(-1,8 %)	53,5	(26,6 %)	54 %	0,88
3est	7-12 ans	483	2,9	(1,9 %)	26,9	(18,1 %)	85 %	0,93
	16-25 ans	309	-1,1	(-0,7 %)	44,6	(26,8 %)	60 %	0,84
	25-31 ans	64	3,0	(1,6 %)	48,7	(25,9 %)	32 %	0,82
3ouest	7-12 ans	615	-2,6	(-1,6 %)	27,8	(17,7 %)	87 %	0,94
	16-25 ans	399	1,1	(0,6 %)	45,3	(25,5 %)	65 %	0,87
	25-31 ans	262	-0,6	(-0,3 %)	56,4	(30,7 %)	50 %	0,82
4est	7-12 ans	398	2,7	(2,0 %)	28,3	(20,8 %)	86 %	0,93
	16-25 ans	145	-2,3	(-1,6 %)	46,9	(32,7 %)	60 %	0,79
	25-31 ans	72	-9,6	(-6,6 %)	66,4	(45,4 %)	22 %	0,55
4ouest	7-12 ans	1032	-2,8	(-2,4 %)	28,0	(24,4 %)	82 %	0,90
	16-25 ans	604	3,9	(3,0 %)	38,6	(30,4 %)	62 %	0,78
	25-31 ans	265	4,0	(3,0 %)	47,0	(34,6 %)	49 %	0,70
5est	7-12 ans	593	-0,5	(-0,4 %)	32,2	(27,6 %)	76 %	0,87
	16-25 ans	192	4,2	(3,6 %)	42,3	(36,6 %)	55 %	0,72
	25-31 ans	102	14,7	(11,0 %)	56,6	(42,3 %)	35 %	0,52
5ouest	7-12 ans	566	0,0	(0,0 %)	19,7	(18,9 %)	91 %	0,95
	16-25 ans	275	-4,4	(-3,6 %)	35,9	(29,9 %)	74 %	0,84
	25-31 ans	50	-7,9	(-7,8 %)	38,4	(38,3 %)	54 %	0,76
6est	7-12 ans	1145	2,2	(2,6 %)	19,4	(22,1 %)	90 %	0,96
	16-25 ans	598	1,5	(1,8 %)	24,3	(29,4 %)	82 %	0,93
	25-31 ans	61	0,4	(0,5 %)	23,6	(32,9 %)	85 %	0,95
6ouest	7-12 ans	682	1,1	(1,3 %)	16,9	(21,4 %)	93 %	0,97
	16-25 ans	300	1,6	(1,6 %)	28,8	(29,8 %)	82 %	0,92
	25-31 ans	64	-2,2	(-3,4 %)	23,8	(37,5 %)	74 %	0,95

Tableau 12. Biais moyen pour la surface terrière marchande ($m^2 \cdot ha^{-1}$), le volume marchand ($m^3 \cdot ha^{-1}$), le nombre de tiges marchandes (tiges$\cdot ha^{-1}$) et le diamètre moyen quadratique (cm) dans les placettes n'ayant pas fait l'objet de coupe, en fonction du groupe d'espèces et de la proportion en surface terrière du groupe d'espèces (valeurs relatives entre parenthèses, n : nombre de mesures, Fi : feuillus intolérants, Ft : feuillus tolérants, Ri : résineux intolérants, Rt : résineux tolérants, Sab : sapin baumier, St : surface terrière)

Groupe d'espèces	Proportion de la surface terrière	Surface terrière marchande			Volume marchand			Nombre de tiges marchandes			Diamètre moyen quadratique		
		n	Moyenne	Biais	n	Moyenne	Biais	n	Moyenne	Biais	n	Moyenne	Biais
Fi	St Fi ≥ 75 %	844	17,0	-0,2 (-0,9 %)	815	112,2	-3,0 (-2,6 %)	817	671	-8 (-1,2 %)	817	18,9	0,4 (2,0 %)
	50 % ≤ St Fi < 75 %	795	12,5	0,1 (1,0 %)	749	87,5	2,0 (2,3 %)	754	432	2 (0,4 %)	752	20,6	0,5 (2,6 %)
	25 % ≤ St Fi < 50 %	1248	8,2	-0,1 (-1,0 %)	1199	55,8	1,0 (1,7 %)	1208	300	-8 (-2,6 %)	1190	20,8	1,0 (4,7 %)
	St Fi ≤ 25 %	3026	2,6	0,1 (4,6 %)	2922	15,5	1,4 (8,7 %)	2942	119	1 (1,1 %)	2726	17,9	1,6 (9,1 %)
Ft	St Ft ≥ 75 %	1009	22,3	0,1 (0,3 %)	945	170,7	0,5 (0,3 %)	977	517	9 (1,7 %)	968	24,5	-0,0 (-0,1 %)
	50 % ≤ St Ft < 75 %	555	15,0	0,4 (2,8 %)	522	104,1	5,0 (4,8 %)	534	442	-15 (-3,4 %)	531	21,9	0,8 (3,7 %)
	25 % ≤ St Ft < 50 %	711	9,4	-0,0 (-0,4 %)	674	61,2	1,0 (1,6 %)	688	329	-13 (-3,8 %)	677	21,0	1,1 (5,2 %)
	St Ft ≤ 25 %	1619	3,2	-0,3 (-10,9 %)	1538	17,5	-1,6 (-9,2 %)	1556	160	-9 (-5,5 %)	1515	16,6	0,2 (0,9 %)
Ri	St Ri ≥ 75 %	312	15,2	-0,1 (-0,4 %)	312	90,1	-5,2 (-5,8 %)	313	894	26 (2,9 %)	312	15,2	-0,1 (-0,7 %)
	50 % ≤ St Ri < 75 %	158	10,5	0,2 (-1,6 %)	158	71,9	3,9 (5,5 %)	159	452	-21 (-4,7 %)	158	17,6	0,3 (1,8 %)
	25 % ≤ St Ri < 50 %	248	6,4	-0,2 (-3,5 %)	248	47,5	1,1 (2,4 %)	250	211	-25 (-11,8 %)	248	21,8	0,9 (4,0 %)
	St Ri ≤ 25 %	711	1,7	-0,0 (-2,0 %)	710	11,9	1,2 (10,2 %)	720	57	-6 (-11,4 %)	641	20,1	1,6 (8,0 %)
Rt	St Rt ≥ 75 %	2566	15,8	-0,1 (-0,4 %)	2559	80,0	-0,9 (-1,1 %)	2566	900	-7 (-0,8 %)	2566	15,2	0,1 (0,7 %)
	50 % ≤ St Rt < 75 %	1236	14,0	0,0 (0,2 %)	1230	81,0	0,8 (0,9 %)	1236	583	-1 (-0,2 %)	1232	19,0	0,4 (2,1 %)
	25 % ≤ St Rt < 50 %	1486	8,6	-0,0 (-0,2 %)	1480	51,9	0,7 (1,3 %)	1486	332	-2 (-0,6 %)	1474	20,6	0,6 (2,9 %)
	St Rt ≤ 25 %	2968	2,9	-0,2 (-5,3 %)	2933	17,0	-1,1 (-6,4 %)	2968	124	3 (2,6 %)	2802	19,2	0,3 (1,5 %)
Sab	St Sab ≥ 75 %	656	18,8	0,2 (0,9 %)	656	97,1	0,6 (0,6 %)	659	951	14 (1,5 %)	637	16,4	0,0 (0,1 %)
	50 % ≤ St Sab < 75 %	912	10,7	-0,1 (-1,0 %)	904	54,8	0,4 (0,7 %)	912	547	-9 (-1,7 %)	864	16,2	-0,0 (-0,2 %)
	25 % ≤ St Sab < 50 %	1589	5,9	-0,3 (-4,6 %)	1578	29,6	-0,4 (-1,4 %)	1592	328	-16 (-4,9 %)	1496	15,4	-0,2 (-1,2 %)
	St Sab ≤ 25 %	3431	2,2	-0,1 (-4,9 %)	3404	10,5	-0,2 (-1,9 %)	3437	141	-1 (-0,6 %)	3084	14,5	0,1 (0,8 %)

2.5.2 *Évaluation après coupe partielle*

Les résultats de la validation croisée des prévisions après coupe partielle de *Hd* et de *Sh* sont présentés au tableau 13, alors que le tableau 14 présente ceux des prévisions de *St*, *V*, *N* et *Dq*. Le nombre d'observations disponibles pour l'évaluation après coupe partielle est largement inférieur à celui en l'absence de coupe. C'est pourquoi seulement six sous-domaines bioclimatiques ont pu être évalués, que l'horizon de simulation ne dépasse pas 16 à 25 ans et que le groupe d'espèces Ri n'a pu être évalué. Les biais associés aux prévisions de *Hd* et de *Sh* sont généralement semblables à ceux obtenus en l'absence de coupe. Dans la plupart des cas, pour les prévisions de *St*, *V* et *N*, les biais associés aux sous-domaines 2ouest, 3ouest et 4ouest sont supérieurs aux biais associés aux prévisions des placettes sans coupe. Pour ces sous-domaines, les valeurs des biais sont inférieures ou égales à 3,4 $m^2 \cdot ha^{-1}$, 27 $m^3 \cdot ha^{-1}$ et 138 $tiges \cdot ha^{-1}$ pour les prévisions de *St*, *V* et *N* respectivement. Dans le cas des sous-domaines 2est, 3est et 4est et pour ces mêmes trois variables, les biais sont semblables à ceux obtenus pour les prévisions en l'absence de coupe. De même, pour les prévisions de *Dq*, les biais en valeur absolue sont semblables à ceux obtenus en l'absence de coupe. Toutefois, les prévisions de *Dq* après coupe partielle surestiment généralement les valeurs observées, à l'inverse des sous-estimations généralement observées en l'absence de coupe. Les biais associés aux prévisions de *St*, *V*, *N* et *Dq* par groupe d'espèces après coupe partielle sont présentés à l'annexe 10.

2.6 Fonctionnement du modèle

Pour produire une simulation de la croissance à long terme des caractéristiques d'une placette (*Hd*, *Sh*, *N*, *St* et *V*), il faut d'abord prédire ces caractéristiques à la fin d'un premier intervalle à partir des valeurs initiales des variables explicatives des

Tableau 13. Biais moyen, racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (REQM), coefficient de détermination (R^2) et coefficient de concordance (CC) pour la hauteur dominante (m) et l'indice de régularité de Shannon dans les placettes ayant fait l'objet de coupe partielle, en fonction du sous-domaine bioclimatique et de l'horizon de simulation (valeurs relatives entre parenthèses, n : nombre de placettes)

Équation	Sous-domaine	Horizon de simulation	n	Biais	REQM	R^2	CC
Hauteur dominante	2est	7-12 ans	50	-0,1 (-0,5 %)	1,3 (7,2 %)	83 %	0,92
	2ouest	7-12 ans	33	0,1 (0,4 %)	1,7 (8,7 %)	79 %	0,86
	3est	7-12 ans	102	0,1 (0,5 %)	1,3 (7,0 %)	87 %	0,94
	3ouest	7-12 ans	181	0,2 (0,9 %)	1,7 (8,3 %)	74 %	0,88
		16-25 ans	52	0,6 (2,9 %)	2,3 (11,5 %)	47 %	0,71
	4est	7-12 ans	80	0,2 (1,2 %)	1,4 (8,1 %)	82 %	0,92
	4ouest	7-12 ans	121	0,0 (-0,2 %)	1,5 (8,0 %)	71 %	0,85
		16-25 ans	34	0,1 (0,7 %)	1,6 (7,9 %)	61 %	0,84
Indice de régularité de Shannon	2est	7-12 ans	50	0,00 (0,2 %)	0,06 (7,8 %)	70 %	0,84
	2ouest	7-12 ans	34	0,00 (0,4 %)	0,06 (7,5 %)	42 %	0,75
	3est	7-12 ans	103	0,00 (-0,5 %)	0,07 (8,4 %)	64 %	0,80
	3ouest	7-12 ans	183	0,01 (1,5 %)	0,08 (9,2 %)	40 %	0,63
		16-25 ans	58	0,04 (4,7 %)	0,09 (10,3 %)	11 %	0,36
	4est	7-12 ans	81	0,00 (-0,2 %)	0,07 (8,3 %)	48 %	0,72
	4ouest	7-12 ans	121	0,01 (1,8 %)	0,08 (9,7 %)	43 %	0,66
		16-25 ans	38	0,02 (2,9 %)	0,08 (9,5 %)	48 %	0,62

Tableau 14. Biais moyen, racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (REQM), coefficient de détermination (R^2) et coefficient de concordance (CC) pour la surface terrière marchande totale ($m^2 \cdot ha^{-1}$), le volume marchand total ($m^3 \cdot ha^{-1}$), le nombre total de tiges marchandes ($tiges \cdot ha^{-1}$) et le diamètre moyen quadratique (cm) dans les placettes ayant fait l'objet de coupe partielle, en fonction du sous-domaine bioclimatique et de l'horizon de simulation (valeurs relatives entre parenthèses, n : nombre de placettes)

Équation	Sous-domaine	Horizon de simulation	n	Biais	REQM	R^2	CC
Surface terrière marchande	2est	7-12 ans	50	-0,4 (-1,6 %)	2,7 (11,6 %)	88 %	0,95
	2ouest	7-12 ans	33	1,3 (5,4 %)	3,6 (15,7 %)	85 %	0,92
	3est	7-12 ans	102	-0,1 (-0,7 %)	3,5 (16,1 %)	77 %	0,89
	3ouest	7-12 ans	181	1,2 (5,1 %)	4,4 (19,2 %)	72 %	0,85
		16-25 ans	57	3,4 (14,3 %)	6,9 (29,2 %)	44 %	0,62
	4est	7-12 ans	80	-0,3 (-1,4 %)	4,5 (18,6 %)	75 %	0,88
	4ouest	7-12 ans	121	1,5 (6,9 %)	4,3 (20,0 %)	73 %	0,85
		16-25 ans	38	2,7 (11,1 %)	5,9 (24,7 %)	53 %	0,72
Volume marchand	2est	7-12 ans	50	-1,6 (-1,1 %)	21,2 (14,7 %)	88 %	0,95
	2ouest	7-12 ans	33	8,5 (5,4 %)	28,4 (17,9 %)	90 %	0,95
	3est	7-12 ans	102	0,6 (0,4 %)	27,5 (19,6 %)	83 %	0,92
	3ouest	7-12 ans	181	8,4 (5,1 %)	39,2 (23,7 %)	73 %	0,86
		16-25 ans	56	27,0 (16,2 %)	54,7 (32,8 %)	48 %	0,66
	4est	7-12 ans	80	-0,5 (-0,3 %)	29,8 (20,3 %)	83 %	0,92
	4ouest	7-12 ans	121	10,7 (7,1 %)	32,6 (21,8 %)	80 %	0,89
		16-25 ans	38	24,1 (13,7 %)	52,4 (29,8 %)	64 %	0,77
Nombre de tiges marchandes	2est	7-12 ans	50	-9 (-1,0 %)	139 (15,2 %)	89 %	0,95
	2ouest	7-12 ans	33	58 (7,3 %)	157 (19,7 %)	71 %	0,86
	3est	7-12 ans	102	4 (0,6 %)	155 (20,5 %)	78 %	0,89
	3ouest	7-12 ans	181	54 (8,4 %)	175 (27,0 %)	59 %	0,81
		16-25 ans	57	138 (18,1 %)	317 (41,6 %)	27 %	0,50
	4est	7-12 ans	80	-35 (-3,9 %)	227 (25,4 %)	79 %	0,90
	4ouest	7-12 ans	121	66 (10,6 %)	199 (32,0 %)	58 %	0,80
		16-25 ans	38	84 (12,9 %)	235 (36,0 %)	33 %	0,70
Diamètre moyen quadratique	2est	7-12 ans	50	-0,1 (-0,4 %)	1,3 (6,9 %)	94 %	0,97
	2ouest	7-12 ans	34	-0,0 (-0,2 %)	1,4 (7,2 %)	86 %	0,93
	3est	7-12 ans	103	-0,2 (-0,9 %)	1,5 (7,3 %)	92 %	0,96
	3ouest	7-12 ans	184	-0,2 (-0,9 %)	2,3 (10,7 %)	77 %	0,89
		16-25 ans	59	-0,3 (-1,2 %)	2,7 (13,0 %)	60 %	0,77
	4est	7-12 ans	82	0,4 (2,2 %)	1,6 (8,3 %)	90 %	0,94
	4ouest	7-12 ans	121	-0,2 (-0,7 %)	2,2 (10,1 %)	82 %	0,91
		16-25 ans	38	0,2 (0,8 %)	2,8 (12,5 %)	73 %	0,86

équations [3] à [15]. Ces valeurs initiales peuvent, par exemple, être tirées d'une placette-échantillon temporaire ou permanente. Étant donné que l'intervalle de temps moyen entre deux mesurages est d'environ 10 ans (Tableau 2), une valeur de 10 devrait toujours être attribuée à Δt pour prédire les changements temporels des variables de croissance. Par la suite, pour prédire les caractéristiques à la fin d'un deuxième intervalle, les valeurs prédites obtenues au premier intervalle sont insérées dans les mêmes équations. Ces itérations par pas de 10 ans doivent se poursuivre jusqu'à ce qu'on ait atteint l'horizon de simulation désiré. Il est possible, à n'importe quel intervalle, de simuler un effet des défoliations causées par la TBE ou celui d'une perturbation naturelle légère (chablis partiel, brûlis partiel ou dépérissement partiel), par le biais des variables explicatives *TBE* et *Perturb*, respectivement. Par exemple, une perturbation naturelle légère entre les années 20 et 30 peut être simulée en posant la variable indicatrice *Perturb* à la valeur 1 lors de la simulation du troisième intervalle de 10 ans.

Le modèle Natura simule la croissance de manière déterministe, c'est-à-dire qu'une simulation fournit une prévision mais sans estimer son incertitude. Il est toutefois possible d'obtenir une évaluation de cette incertitude par une approche de simulation stochastique, qui utilise le procédé de Monte-Carlo. Celui-ci consiste à utiliser des nombres aléatoires afin de simuler les distributions des variables dépendantes (Vanclay 1994). Selon la variable dépendante, différentes sources d'incertitude sont prises en compte : les erreurs associées à l'estimation des paramètres, les effets aléatoires de placette ou les erreurs résiduelles.

Une simulation de Monte-Carlo consiste à répéter un certain nombre de fois (*h*) la simulation d'une même placette, en générant des nombres aléatoires différents à chaque itération. Chaque itération génère des vecteurs de nombres aléatoires suivant des lois normales multivariées, pour simuler les erreurs associées aux estimations des paramètres des différentes équations. Des nombres aléatoires suivant une loi normale sont ensuite générés afin de représenter les effets aléatoires relatifs à la placette, dans les équations concernées. Les erreurs associées aux estimations des paramètres ainsi que les effets aléatoires de placettes demeurent constants tout au long de la simulation de la croissance d'une placette. Selon l'équation, un nouveau vecteur de nombres aléatoires suivant des lois normales multivariées, ou de nouveaux nombres aléatoires normalement distribués, sont générés à chaque intervalle de 10 ans, pour représenter l'erreur résiduelle de chaque équation. Une prévision est obtenue par la moyenne des *h* itérations, alors qu'un intervalle de confiance est obtenu par les rangs percentiles. Par exemple, les percentiles 2,5 et 97,5 délimitent un intervalle de confiance à 95 %. Différentes séries de *h* itérations produiront des prévisions moyennes légèrement différentes, à cause du caractère aléatoire du procédé. Les différences diminuent en augmentant le nombre d'itérations, mais le temps en ressources informatiques augmente. Des tests préliminaires ont démontré que 1 000 itérations sont suffisantes pour obtenir une moyenne relativement stable dans un temps raisonnable.

2.7 Exemples de simulation

Deux placettes ont été sélectionnées pour illustrer les possibilités du modèle. La première, une placette à fort volume située dans la pessière à mousses de l'est (6est), principalement composée de sapin baumier et d'épinette noire, compte des arbres codominants et dominants âgés en moyenne de 112 ans. La deuxième placette, à plus faible volume, est située dans la sapinière à bouleau blanc de l'est (5est), et est principalement composée de sapin baumier, d'épinette noire et de bouleau à papier, dont les arbres codominants et dominants ont en moyenne 48 ans. Sur chacune des placettes, deux simulations stochastiques ont été effectuées, avec un horizon de 40 ans et des intervalles de 10 ans : une première, sans défoliation par la TBE, et une deuxième, avec des défoliations par la TBE durant le deuxième intervalle (indice de réduction de croissance de 3,0, correspondant à 6,2 années avec des défoliations sévères sur une période de 10 ans [tableau 15]). Les résultats des simulations pour chacune des placettes sont présentés à la figure 1.

La première placette illustre la capacité du modèle à prévoir des décroissances à un âge avancé. Dans cet exemple, la décroissance reflète des pertes par mortalité plus forte que les gains par accroissement des survivants et par recrutement (Figure 1a). De plus, la mortalité causée par la TBE se traduit par une perte supplémentaire en volume d'environ 55 $m^3 \cdot ha^{-1}$ entre les années 10 et 20 (Figure 1b). Pour la placette à plus faible volume, le modèle prévoit une croissance du volume d'environ 3,2 $m^3 \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$ sur 40 ans (Figure 1c). Dans ce cas-ci, l'effet de la TBE se manifeste par un ralentissement de la croissance (Figure 1d). Dans tous les cas, l'incertitude d'une prévision augmente avec l'horizon de simulation.

Tableau 15. Équivalence entre les valeurs de l'indice de réduction de croissance due à la tordeuse des bourgeons de l'épinette et le nombre d'années avec défoliations sévères sur une période de 10 ans

Indice de réduction de croissance	Nombre moyen d'années avec défoliations sévères sur une période de 10 ans
1	1,2
2	3,8
3	6,2
4	8,6

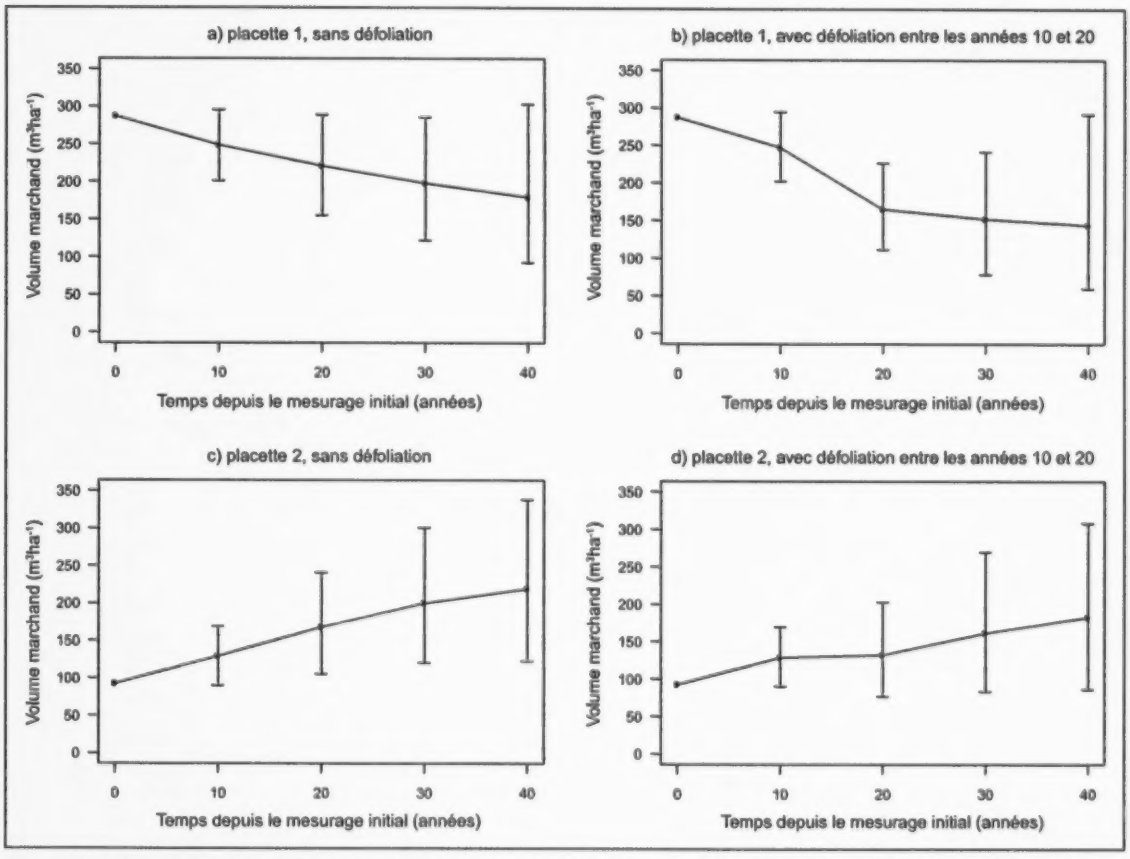


Figure 1. Quatre simulations stochastiques illustrant l'évolution du volume marchand total de deux placettes, en l'absence et en présence de défoliation causée par la tordeuse des bourgeons de l'épinette (indice de réduction de croissance de 3,0). La placette 1 (a et b) provient du sous-domaine bioclimatique de la pessière à mousses de l'est (6est), avec un âge moyen des arbres codominants et dominants de 112 ans au mesurage initial. La placette 2 (c et d) provient du sous-domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau blanc de l'est (5est), avec un âge moyen des arbres codominants et dominants de 48 ans au mesurage initial. Les barres d'erreurs représentent l'intervalle de confiance à 95 %.

Chapitre trois

Discussion

3.1 Comparaison avec le modèle de Pothier et Savard (1998)

Natura est principalement destiné à alimenter le modèle qui sera utilisé pour les calculs de la possibilité forestière, lesquels visent à déterminer le volume de bois récoltable annuellement sur une superficie donnée et pour un groupe d'espèces donné. Bien que ces calculs soient sujets à plusieurs imprécisions, liées notamment aux inventaires, aux hypothèses de rendement des stratégies sylvicoles et à la composition des strates de retour, il demeure important que le modèle décrive les changements de volume à long terme avec le plus de précision possible. Au cours des dernières années, le modèle de production à l'échelle du peuplement utilisé à cette fin était celui mis au point par Pothier et Savard (1998), ci-après désigné par P&S. Grâce au très grand nombre de placettes-échantillons temporaires utilisées pour son étalonnage, ce modèle s'est révélé suffisamment précis et robuste malgré certaines lacunes mentionnées dans l'introduction du présent document. Par conséquent, P&S constitue la référence à laquelle il faut se comparer pour évaluer la précision et l'exactitude de Natura, et donc la pertinence d'en faire le nouveau modèle de production à l'échelle du peuplement. Cette comparaison a été effectuée sur la base d'une validation croisée, à partir des mêmes placettes-échantillons permanentes. Dans le modèle P&S, les âges de sénescence utilisés pour le sapin baumier, l'épinette noire, le peuplier faux-tremble et le pin gris sont ceux présentés à la page 14 de MRNFP (2004). Les taux annuels de diminution de l'accroissement annuel périodique utilisés pour ces mêmes espèces sont ceux présentés à la page 5 de MRN (2003). Pour les peuplements mixtes, la règle de proportionnalité a été utilisée pour P&S, c'est-à-dire que le volume de chaque espèce a été multiplié par la proportion de la surface terrière totale occupée par cette espèce. Il est à noter que ce sont les mêmes placettes-échantillons qui ont servi à étalonner les équations de Natura, ce qui confère un avantage à ce dernier modèle.

Puisque P&S a été conçu pour des peuplements purs (≥ 75 % de la surface terrière occupée par la même espèce), la comparaison des deux modèles débute par ce type de peuplement. Dans le cas des sapinières, la valeur absolue des biais annuels produits par Natura est inférieure à ceux de P&S (Tableau 16). Ceci est vrai même si les biais annuels de Natura tendent à augmenter avec l'horizon de simulation, et bien qu'ils soient toujours inférieurs à 1 $m^3 \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$. Ce résultat, observé pour la plupart des espèces, indique qu'il est préférable de limiter l'étendue des horizons de simulation pour éviter de s'exposer à de trop gros biais. De grands écarts entre les deux modèles sont observés lorsque les biais sont comparés par classe d'indice de réduction de croissance due à la TBE, de même que par sous-domaine bioclimatique. Ainsi, pour chacune de ces classes, les biais associés aux prévisions de Natura sont relativement faibles, alors que ceux de P&S sont parfois très grands. L'introduction de la réduction de croissance due à la TBE dans Natura produit donc un gain appréciable en précision et exactitude, qui justifie sa prise en compte. Les résultats montrent aussi que Natura est beaucoup moins biaisé que P&S lorsque le modèle s'applique à l'intérieur de chacun des sous-domaines bioclimatiques. Le biais global de P&S, qui apparait raisonnable, masque donc de forts biais négatifs et positifs associés aux différents niveaux de dommages de TBE et aux sous-domaines bioclimatiques, qui se compensent à l'échelle du Québec. Puisque les calculs de la possibilité forestière sont effectués sur des territoires à la fois plus petits que ceux correspondant aux sous-domaines bioclimatiques et exposés de manière différente aux défoliations de la TBE, l'utilisation de Natura est donc fortement recommandée pour le sapin baumier.

Le cas des peuplements dominés par l'épinette noire est assez semblable à celui du sapin baumier, mais à un degré moindre (Tableau 16). En effet, puisque l'épinette noire est moins vulnérable aux défoliations de la TBE que le sapin baumier (Erdle et MacLean 1999, Nealis et Régnière 2004, Hennigar *et al.* 2008), les écarts de biais entre P&S et Natura par classe d'indice de réduction de croissance due à la TBE, bien que présents, sont beaucoup moins importants que dans le cas des sapinières. Aussi, les valeurs de REQM calculées pour Natura sont presque toujours inférieures à celles de P&S (Tableau 16), ce qui indique que les prévisions de Natura s'approchent davantage des valeurs observées. Malgré des écarts moins substantiels que ceux rapportés pour le sapin baumier, la performance prévisionnelle de Natura est généralement supérieure à celle de P&S, ce qui est suffisant pour recommander son utilisation.

Tableau 16. Biais annuel moyen ($m^3 \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$) et racine carrée de l'erreur quadratique annuelle moyenne (REQM, $m^3 \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$) pour la production annuelle prédite avec les modèles de POTHIER-SAVARD (1998; P&S) et Natura, dans les placettes en peuplement pur n'ayant pas fait l'objet de coupe, en fonction de l'espèce, du sous-domaine bioclimatique, de l'indice de réduction de croissance due à la tordeuse des bourgeons de l'épinette (TBE) et de l'horizon de simulation (n : nombre de mesures)

Espèce	Sous-domaine	Indice TBE	Horizon de simulation		Biais		REQM	
				n	P&S	Natura	P&S	Natura
SAB				647	-0,6	0,3	3,6	3,3
			7-12 ans	419	-0,7	0,1	4,4	3,9
			16-25 ans	163	-0,5	0,3	3,0	2,6
			25-31 ans	60	-0,6	0,5	2,7	2,6
		0		312	0,3	0,2	3,2	3,1
		]0-1]		116	-0,9	0,1	3,9	3,4
		]1-2]		89	-2,1	0,0	4,4	3,7
		]2-3]		83	-2,1	0,7	4,9	4,3
		3 et +		47	-2,1	0,8	4,2	3,4
	1 à 3*			49	-1,2	0,1	3,7	2,7
	4est			89	0,1	0,7	3,8	4,4
	4ouest			83	-2,0	0,5	3,6	3,1
	5est			247	-0,4	0,1	4,3	3,9
	5ouest			38	-2,7	-0,1	3,9	2,6
	6est			135	0,2	0,3	2,3	2,1
EPN				2101	-0,1	-0,1	1,6	1,2
			7-12 ans	1291	-0,3	-0,1	2,0	1,7
			16-25 ans	673	0,0	-0,1	1,4	1,0
			25-31 ans	133	-0,1	-0,2	1,4	1,1
		0		1316	0,1	-0,1	1,4	1,1
		]0-1]		484	-0,4	-0,1	2,0	1,5
		]1-2]		204	-0,7	-0,4	2,3	2,2
		]2-3]		97	-0,5	-0,2	2,6	1,8
	1 à 3*			45	0,7	-0,4	2,1	2,3
	4ouest			238	0,0	-0,1	1,9	1,6
	5est			79	-0,1	0,0	3,3	2,5
	5ouest			192	-0,1	-0,5	1,5	1,5
	6est			862	0,2	-0,1	1,2	0,9
	6ouest			657	-0,7	-0,1	2,1	1,4
PIG				304	0,0	-0,3	1,8	1,9
			7-12 ans	210	0,2	-0,3	1,9	2,1
			16-25 ans	77	-0,1	-0,3	1,6	1,6
	4ouest			67	0,4	-0,1	2,2	1,7
	5ouest			96	0,3	-0,6	1,7	2,2
	6ouest			99	-0,6	0,0	1,9	1,9
PET				180	-0,3	0,0	2,8	2,8
			7-12 ans	105	-0,2	-0,2	3,0	3,2
			16-25 ans	54	-0,3	0,1	2,5	2,5
	1 à 3*			48	0,8	0,4	2,4	2,2
	4est			32	-0,2	-0,2	1,9	2,3
	4ouest			40	-1,4	-0,3	3,2	2,9
	5ouest			50	-0,7	-0,2	3,1	3,2
BOP				273	0,1	0,1	1,2	1,5
			7-12 ans	158	0,1	-0,1	1,6	1,8
			16-25 ans	84	0,1	0,2	1,1	1,4
			25-31 ans	31	0,0	0,1	0,8	1,0
	1 à 3*			30	0,1	-0,6	1,0	1,4
	4ouest			108	0,0	0,2	1,2	1,4
	5est			50	-0,1	0,2	1,3	1,2
	5ouest			43	0,5	0,3	1,3	1,4

* Comprend les sous-domaines bioclimatiques 1, 2est, 2ouest, 3est et 3ouest.

Dans le cas des peuplements dominés par le pin gris, le peuplier faux-tremble et le bouleau à papier, la comparaison des deux modèles a produit des résultats semblables (Tableau 16). En effet, les biais et les REQM globaux, calculés par pas de simulation et par sous-domaine bioclimatique, donnent l'avantage tantôt à l'un, tantôt à l'autre des deux modèles, dans des proportions équivalentes. Pour ces trois espèces, on peut donc conclure que les deux modèles produisent des prévisions similaires, en termes de précision et d'exactitude.

En ce qui concerne les peuplements mixtes comportant du sapin baumier, la comparaison des valeurs du biais et de REQM des deux modèles montre un avantage marqué de Natura (Tableau 17). Toutefois, cet avantage disparaît pour les peuplements comportant de l'épinette noire en mélange avec du peuplier faux-tremble ou avec du pin gris (Tableau 17). En ce sens, ces résultats suivent la tendance dégagée à partir des peuplements purs, car l'avantage de Natura dans les sapinières se reflète dans le peuplement composé de sapin et de bouleau à papier. L'utilisation de placettes mixtes dans l'étalonnage de Natura ne semble donc pas mener à un gain significatif de précision et d'exactitude par rapport à la méthode de proportionnalité appliquée aux prévisions pour des peuplements purs par P&S.

Tableau 17. Biais annuel moyen ($m^3 \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$) et racine carrée de l'erreur quadratique annuelle moyenne (REQM, $m^3 \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$) pour la production annuelle prédite avec les modèles de POTHIER-SAVARD (1998; P&S) et Natura, dans les placettes en peuplement mixte n'ayant pas fait l'objet de coupe, en fonction du mélange d'espèces, du sous-domaine bioclimatique et de l'horizon de simulation (n : nombre de mesures)

Espèces	Sous-domaine	Horizon de simulation		Biais		REQM	
			n	P&S	Natura	P&S	Natura
BOP-SAB			432	-1,1	-0,3	3,0	2,3
		7-12 ans	239	-1,0	-0,2	3,6	3,1
		16-25 ans	135	-1,0	-0,3	2,5	2,0
		25-31 ans	55	-1,1	-0,3	2,2	1,4
	1 à 3*		81	-0,4	-0,5	2,5	2,3
	4ouest		171	-1,5	-0,4	3,3	2,5
	5est		63	-0,2	0,3	2,1	1,8
	5ouest		62	-1,9	-0,8	3,2	1,9
EPN-PET			83	0,5	0,4	2,2	2,2
		7-12 ans	46	0,4	0,9	2,2	2,6
		16-25 ans	27	0,5	0,3	1,9	1,9
	4ouest		27	-0,3	-0,2	2,1	1,9
	5ouest		23	1,0	0,5	1,9	2,0
EPN-PIG			252	0,0	0,1	1,8	1,9
		7-12 ans	178	0,0	0,3	2,0	2,1
		16-25 ans	62	0,1	0,0	1,5	1,7
	4ouest		50	0,2	0,3	1,9	1,5
	5ouest		69	0,5	0,0	2,0	2,1
	6ouest		106	-0,4	0,2	1,4	1,6

* Comprend les sous-domaines bioclimatiques 1, 2est, 2ouest, 3est et 3ouest.

En résumé, les gains en précision et en exactitude de Natura par rapport à P&S sont surtout manifestes pour les peuplements ayant une forte composante de sapin baumier et, dans une moindre mesure, d'épinette noire. Pour ces peuplements, l'analyse des biais et des REQM montre que l'avantage de Natura est lié à la prise en compte des effets de la TBE et de la disparité régionale de croissance. Cependant, la dernière épidémie de TBE (1970-1990) a produit des effets différents entre les régions du Québec, qui peuvent grossièrement être décrits par des impacts faibles au nord et au sud du territoire forestier québécois, et des impacts élevés en Gaspésie (Gray *et al.* 2000). La valeur des biais engendrés par P&S, en fonction des sous-domaines bioclimatiques, montre justement une grande variation entre les sous-domaines de l'est et ceux de l'ouest, ce qui indique que le gain régional associé à Natura est très probablement lié au gain causé par la prise en compte des effets de la TBE. Puisqu'il n'est pas possible de dissocier ces deux effets, il faut conclure que les éléments majeurs qui semblent expliquer le gain en précision et en exactitude de Natura par rapport à P&S sont d'une part, l'introduction d'une variable tenant compte des effets de la TBE, et d'autres part, celle d'une variable exprimant la variabilité régionale de croissance non liée à la TBE. Par ailleurs, mises à part les pessières noires, les résultats de l'ensemble des types de peuplements montrent que Natura tend à sous-estimer les petits volumes et à surestimer les plus gros volumes, ce qui est aussi le cas de P&S. Il faudra analyser ce problème dans un avenir rapproché de façon à en trouver les causes et y remédier.

3.2 Limites d'utilisation du modèle

Bien que Natura comporte des avantages constituant un progrès appréciable pour modéliser la production des forêts québécoises, il ne faut pas perdre de vue les limites liées à son utilisation. Ces éléments seront passés en revue dans la présente section.

Natura a été conçu en vue de prévoir directement les changements temporels de production forestière des peuplements mixtes, ce qui constitue un avantage par rapport à P&S. Cependant, il n'était pas possible de modéliser la croissance de toutes les combinaisons d'espèces présentes au Québec puisque le nombre d'équations à étalonner aurait été beaucoup trop grand. Il a donc fallu réduire leur nombre, en formant cinq groupes d'espèces relativement homogènes quant aux caractéristiques des arbres et à leur vitesse de croissance. L'utilisation de Natura dans des peuplements mixtes ne produit donc pas d'informations directes sur la productivité des espèces individuelles lorsque plusieurs de ces espèces appartiennent au même groupe. Toutefois, la connaissance des espèces en présence, à partir de l'inventaire servant de base aux projections temporelles, permet de déduire les espèces présentes à la fin de l'horizon de projection à l'aide de règles de proportionnalité. Le plus gros problème lié au regroupement des espèces provient plutôt du fait qu'à l'intérieur d'un même groupe, toutes les espèces sont associées au même patron de croissance alors qu'en réalité, certaines différences peuvent exister. C'est le cas, par exemple, de l'épinette noire, qui a un rythme de croissance moins élevé que celui des épinettes rouge et blanche sur une station donnée (p. ex. : Wright *et al.* 1998). Cependant, Natura, attribue à ces trois espèces des caractéristiques de croissance similaires, qui devraient être très proches de celles de l'épinette noire, étant donné le très grand nombre de placettes comportant cette espèce par rapport aux deux autres. Pour réduire la portée de ce problème, une variable a été ajoutée au modèle de prévision de la surface terrière, signalant les cas où une proportion de la surface terrière supérieure à 50 % serait occupée par de l'épinette blanche, de l'épinette rouge, de la pruche ou du thuya. Lorsque cette proportion est inférieure à 50 %, il est probable que la croissance des épinettes rouge et blanche soit sous-estimée par Natura. Toutefois, il ne semble pas que ce problème potentiel soit trop aigu si l'on considère la légère surestimation des volumes prédits du groupe d'espèces Rt par Natura dans le sous-domaine bioclimatique 3ouest (Annexe 9), c'est-à-dire la région du sud du Québec, où l'on devrait retrouver le plus d'épinettes rouge et blanche.

Dans un autre ordre d'idées, Natura comprend une équation pour prédire le nombre d'arbres marchands (*N*) pour chaque groupe d'espèces. Or, la variation de *N* au cours d'un horizon de simulation peut être influencée tant par le recrutement de nouveaux arbres ayant atteint le diamètre marchand minimal (9,1 cm) que par la mortalité d'arbres marchands. Natura ne permet pas de distinguer le recrutement de la mortalité, ce qui aurait pu être utile à certaines études visant à quantifier, par exemple, la production de chicots dans le cadre d'un aménagement écosystémique. Nous avons jugé que cet inconvénient était largement compensé par la simplification de la structure du modèle, qui évite ainsi de créer d'autres problèmes (Vanclay 1994). Malgré cette simplification du modèle, *N* semble être le maillon

faible de la chaîne d'équations, ce qui se traduit notamment par des estimations peu fiables du diamètre moyen quadratique et du volume moyen par tige.

La robustesse d'un modèle peut se définir par sa capacité à produire des prévisions sensées, même si les valeurs des variables prédites sont à la limite de leur champ de variation. Par exemple, un modèle robuste pourrait prévoir une production de 350 $m^3 \cdot ha^{-1}$ après 10 ans de croissance, pour un peuplement d'épinette noire comportant initialement 330 $m^3 \cdot ha^{-1}$ et 5000 arbres$\cdot ha^{-1}$ et dont la hauteur dominante à 50 ans est de 22 m. Avec un modèle peu robuste, la prévision de la production à partir de telles valeurs initiales limites pourrait être de 800 $m^3 \cdot ha^{-1}$, ce qui serait assez inusité pour une pessière noire. Puisque la forme mathématique des équations utilisées dans Natura et P&S ne semble pas affecter leur robustesse, nous croyons que celle-ci est surtout liée au nombre et à l'étendue des placettes d'étalonnage. Ainsi, Natura a été étalonné pour l'ensemble des espèces forestières québécoises à partir des mesures répétées d'environ 8 000 placettes-échantillons permanentes, ce qui est beaucoup et peu à la fois. Ce nombre est élevé si l'on considère les coûts associés à l'établissement et aux mesurages successifs de ces placettes, mais il est petit comparativement aux quelques 42 600 placettes-échantillons temporaires utilisées par POTHIER et SAVARD (1998). Il faut donc s'attendre à ce que Natura soit moins robuste que P&S, ce qui met en évidence le besoin de valider soigneusement les données de départ des simulations pour éviter d'engendrer des prévisions aberrantes.

Une autre limite d'utilisation de Natura est liée à la période de suivi des placettes-échantillons permanentes. En effet, ces placettes ont été mesurées de 2 à 6 reprises dans un laps de temps ne dépassant pas 40 ans, ce qui correspond à l'horizon de simulation maximal de Natura. Au-delà de cette période, le modèle pourrait produire des prévisions qui s'éloignent sensiblement de la réalité, particulièrement lorsque l'âge atteint par les peuplements simulés dépasse la longévité moyenne des espèces en présence (170 ans pour l'épinette noire – GARET 2008). Ce dernier problème pourrait toutefois être évité en utilisant le temps écoulé depuis la dernière perturbation comme variable temporelle, au lieu de l'âge moyen des arbres échantillons. En effet, GARET *et al.* (2009) ont démontré que l'utilisation du temps écoulé depuis la dernière perturbation était associé à des courbes de production plus fiables que celles étalonnées à partir de l'âge moyen des arbres échantillons. Cette situation s'expliquerait par la mortalité graduelle des arbres dominants dans les peuplements vieillissants composés d'espèces tolérantes à l'ombre. Des arbres plus jeunes profitent des trouées résultant de cette mortalité pour atteindre l'étage dominant (RAULIER *et al.* 2003). Ceci a pour effet de stabiliser l'âge moyen des arbres dominants alors que dans les faits, le peuplement continue de vieillir (GARET 2008).

Finalement, il faut aussi rappeler qu'en tant que modèle strictement empirique, Natura ne devrait être utilisé que pour des conditions équivalentes à celles des placettes-échantillons ayant servi à son étalonnage. Ainsi, Natura ne devrait être utilisé que pour simuler la croissance de placettes de 400 m^2 ; il ne devrait pas être utilisé pour simuler les changements temporels de production forestière de peuplements ayant subi une perturbation partielle, peu importe le stade de développement pendant lequel cette perturbation a eu lieu. C'est le cas, par exemple, de peuplements ayant subi une éclaircie précommerciale ou commerciale, une coupe progressive irrégulière, une coupe de jardinage ou un chablis partiel. Les changements temporels de production à la suite de ce type de perturbation devront faire l'objet d'hypothèses ou, préférablement, être simulés par un modèle conçu pour tenir compte des changements environnementaux causés par ces traitements sylvicoles, de façon à prévoir la réaction de croissance des arbres résiduels.

Conclusion

Bien que le modèle de Pothier et Savard (1998) se soit révélé suffisamment précis et robuste pour prévoir les changements temporels de production forestière, il comportait certaines lacunes qui étaient clairement identifiées dans leur ouvrage. La lacune principale était liée à une épidémie de tordeuse des bourgeons de l'épinette (TBE) qui a réduit la croissance et la survie du sapin baumier et des épinettes blanche, rouge et noire pendant une période s'étendant de 1970 à 1990. Or, cette période coïncide avec l'établissement d'un grand nombre de placettes échantillons qui ont donc probablement été touchées par la TBE, même si plusieurs ont été retirées du fichier d'étalonnage parce que leur volume diminuait très rapidement. Malgré cette procédure de sélection des placettes, le modèle de P&S est demeuré sensible aux défoliations de la TBE, comme l'indique la sous-estimation (biais positif) du volume en période non épidémique (Tableau 16, indice de TBE = 0), ainsi que la surestimation (biais négatif) en période épidémique (Tableau 16, indice de TBE > 0). Cette lacune a été corrigée lors de l'étalonnage de Natura en introduisant une variable tenant compte de l'historique de défoliation des placettes par la TBE. L'introduction de cette variable explique une grande partie du gain en précision et en exactitude de Natura par rapport au modèle de Pothier et Savard (1998), dans le cas des peuplements ayant une forte composante en sapin baumier et, dans une moindre mesure, en épinette noire. Une autre partie de gain en précision et en exactitude est attribuable à la prise en compte par Natura de disparités régionales de croissance par l'introduction d'une variable ajustant la production en fonction des sous-domaines bioclimatiques. En outre, Natura a aussi l'avantage de modéliser le déclin du volume à des âges avancés sans avoir recours à des artifices comme c'était le cas pour le modèle de Pothier et Savard (1998).

En conséquence, nous recommandons l'utilisation de Natura pour les futurs calculs de la possibilité forestière, dont la précision devrait être améliorée dans le cas des territoires comportant beaucoup de sapins et d'épinettes. Toutefois, dans le cas des autres espèces, Natura devrait produire des résultats très similaires à ceux du modèle de Pothier et Savard (1998), ce qui peut être interprété comme un résultat rassurant pour la validité des anciens calculs de la possibilité forestière.

La similitude des résultats de Natura avec ceux de Pothier et Savard (1998) indique que ce dernier modèle possédait des qualités qui ont peut-être été perdues en adoptant l'approche de Natura. En effet, la robustesse du modèle de Pothier et Savard (1998) lui était notamment conférée par l'utilisation de plus de 42 000 placettes-échantillons temporaires, comparativement à environ 8 000 placettes-échantillons permanentes pour Natura. Une future approche pourrait donc tenter de combiner ces deux types de placettes-échantillons, dans le but d'allier exactitude, précision et robustesse. Finalement, aucun des deux modèles n'a été conçu pour prévoir les effets des traitements sylvicoles dont les modalités changent continuellement avec le temps. Nous sommes d'avis qu'il serait important de mettre au point un modèle flexible de prévision des effets des traitements sylvicoles pour compléter la gamme de modèles présentement à la disposition des aménagistes forestiers québécois.

Références bibliographiques

Barrio Anta, M., F. Castedo Dorado, U. Diéguez-Aranda, J.G. Alvarez González, B.R. Parresol et R. Rodriguez Soalleiro, 2006. *Development of a basal area growth system for maritime pine in northwestern Spain using the generalized algebraic difference approach.* Rev. Can. Rech. For. 36 : 1461-1474.

Bégin, J. et F. Raulier, 1995. *Comparaison de différentes approches, modèles et tailles d'échantillons pour l'établissement de relations hauteur-diamètre locales.* Rev. Can. Rech. For. 25 : 1303-1312.

Boudoux, M., 1978. *Tables de rendement empiriques pour l'épinette noire, le sapin baumier et le pin gris au Québec.* Gouvernement du Québec, ministère des Terres et Forêts, COGEF. 101 p.

Erdle, T.A. et D.A. MacLean, 1999. *Stand growth model calibration for use in forest pest impact assessment.* For. Chron. 75(1) : 141-152.

Fang, Z. et R.L. Bailey, 1998. *Height–diameter models for tropical forests on Hainan Island in Southern China.* For. Ecol. Manage. 110 : 315-327.

Fortin, M., J. DeBlois, S. Bernier et G. Blais, 2007. *Mise au point d'un tarif de cubage général pour les forêts québécoises : une approche pour mieux évaluer l'incertitude associée aux prévisions.* For. Chron. 83 : 754-765.

Fortin, M. et L. Langevin, 2010. *ARTEMIS-2009 : un modèle de croissance basé sur une approche par tiges individuelles pour les forêts du Québec.* Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 156. 48 p.

Fortin, M., S. Bernier, J.-P. Saucier et F. Labbé, 2009. *Une relation hauteur-diamètre tenant compte de l'influence de la station et du climat pour 20 espèces commerciales du Québec.* Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 153. 22 p.

Gallant, A.R., 1987. *Nonlinear statistical models. Applied probability and statistics series.* Wiley, New York. 610 p.

Garet, J., 2008. *Influence des caractéristiques de la sénescence sur la possibilité forestière.* Mémoire de Maîtrise (M. Sc.). Université Laval. 72 p.

Garet, J., D. Pothier et M. Bouchard, 2009. *Predicting the long-term yield trajectory of black spruce stands using time since fire.* For. Ecol. Manage. 257 : 2189-2197.

Gray, D.R., J. Règnière et B. Boulet, 2000. *Analysis and use of historical patterns of spruce budworm defoliation to forecast outbreak patterns in Quebec.* For. Ecol. Manage. 127 : 217-231.

Gregoire, T.G., O. Schabenberger et J.P. Barrett, 1995. *Linear modelling of irregularly spaced, unbalanced, longitudinal data from permanent-plot measurements.* Rev. Can. Rech. For. 25 : 137-156.

Hennigar, C.R., D.A. MacLean, D.T. Quiring et J.A.J. Kershaw, 2008. *Differences in spruce budworm defoliation among balsam fir and white, red, and black spruce.* For. Sci. 54 : 158-166.

Huang, S., S.X. Meng et Y. Yang, 2009. *Assessing the goodness of fit of forest models estimated by nonlinear mixed-model methods.* Rev. Can. Rech. For. 39 : 2418-2436.

Landsberg, J., 2003. *Physiology in forest models: history and the future.* FBMIS 1 : 49-63.

Lexerød, N.L. et T. Eid, 2006. *An evaluation of different diameter diversity indices based on criteria related to forest management planning.* For. Ecol. Manage. 222 : 17-28.

Mäkelä, A., J. Landsberg, A.R. Ek, T.E. Burk, M. Ter-Mikaelian, G.I. Ågren, C.D. Oliver et P. Puttonen, 2000. *Process-based models for forest ecosystem management: current state of the art and challenges for practical implementation.* Tree Phys. 20 : 289-298.

MRN, 2003. *Rapport préliminaire sur les caractéristiques de la sénescence des principaux peuplements forestiers québécois.* Rapport interne. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles. 15 p.

MRNFP, 2004. *Détermination de l'âge approximatif d'entrée en sénescence des principaux peuplements forestiers à l'aide des placettes-échantillons temporaires.* Rapport interne. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs. 44 p.

Nealis, V.G. et J. Régnière, 2004. *Insect-host relationships influencing disturbance by the spruce budworm in a boreal mixedwood forest.* Rev. Can. Rech. For. 34 : 1870-1882.

Ouzennou, H., D. Pothier et F. Raulier, 2008. *Adjustment of the age-height relationship for uneven-aged black spruce stands.* Rev. Can. Rech. For. 38 : 2003-2012.

Pardé, J. et J. Bouchon, 1988. *Dendrométrie, 2e édition.* Nancy, France, ENGREF, 328 p.

Parresol, B.R., 2001. *Additivity of nonlinear biomass equations.* Rev. Can. Rech. For. 31 : 865-878.

Pothier, D. et F. Savard, 1998. *Actualisation des tables de production pour les principales espèces forestières du Québec.* Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, RN98-3054. 183 p.

Pothier, D., D. Mailly et S. Tremblay, 2005. *Predicting balsam fir growth reduction caused by spruce budworm using large-scale historical records of defoliation.* Ann. For. Sci. 62 : 261-267.

Pothier, D. et D. Mailly, 2006. *Stand-level prediction of balsam fir mortality in relation to spruce budworm defoliation.* Rev. Can. Rech. For. 36 : 1631-1640.

Prégent, G., G. Picher et I. Auger, 2010. *Tarif de cubage, tables de rendement et modèles de croissance pour les plantations d'épinette blanche au Québec.* Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 160. 73 p.

Raulier, F., M.-C.Lambert, D. Pothier et C.-H. Ung, 2003. *Impact of dominant tree dynamics on site index curves.* For. Ecol. Manage. 184 : 65-78.

Régnière, J. et R. Saint-Amand, 2008. *BioSIM 9 : Manuel de l'utilisateur.* Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie des Laurentides. Rapport d'information LAU-X-134f. 74 p.

Régnière, J., B. Cooke et V. Bergeron, 1995. *BioSIM : Un instrument informatique d'aide à la décision pour la planification saisonnière de la lutte antiparasitaire – Guide d'utilisation.* Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie des Laurentides. Rapport d'information LAU-X-116f. 50 p.

Reineke, L.H., 1933. *Perfecting a stand-density index for even-aged forests.* J. Agr. Res. 46 : 627-638.

SAS Institute Inc., 2004a. *SAS/ETS® 9.1 User's Guide.* Cary, NC : SAS Institute Inc.

SAS Institute Inc., 2004b. *SAS/STAT® 9.1 User's Guide.* Cary, NC : SAS Institute Inc.

Saucier, J.-P., B. Seck et B. Ouzennou, en préparation. *SUCCÈS-2009 : un modèle de succession forestière aux fins de l'aménagement forestier.* Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière.

Shaw, J.D. et J.N. Long, 2007. *A density management diagram for longleaf pine stands with application to red-cockaded woodpecker habitat.* South. J. Appl. For. 31 : 28-38.

Tomé, J., M. Tomé, S. Barreiro et J.A. Paulo, 2006. *Age-independent difference equations for modelling tree and stand growth.* Rev. Can. Rech. For. 36 : 1621-1630.

Vanclay, J.K., 1994. *Modelling forest growth and yield, applications to mixed tropical forests.* CAB International, Wallingford, UK. 312 p.

Vanclay, J.K. et J.P. Skovsgaard, 1997. *Evaluating forest growth models.* Ecological Modelling 98(1) : 1-12.

Vonesh, E.F., V.M. Chinchilli et K. Pu, 1996. *Goodness-of-fit in generalized nonlinear mixed-effects models.* Biometrics 52 : 572-587.

Woollons, R.C., 1998. *Even-aged stand mortality estimation through a two-step regression process.* For. Ecol. Manage. 105 :189-195.

Wright, E.F., K.D. Coates, C.D. Canham et P. Bartemucci, 1998. *Species variability in growth response to light across climatic regions in northwestern British Columbia.* Rev. Can. Rech. For. 28 : 871-886.

Annexes

Annexe 1. Liste des espèces dans chacun des groupes d'espèces et leur nombre de tiges

Groupe d'espèces	Espèce	Code*	Nombre de tiges	Pourcentage (%)
Feuillus intolérants (Fi)	Bouleau gris	BOG	1 512	1,1
	Bouleau à papier	BOP	87 829	64,8
	Caryer cordiforme	CAC	33	0,0
	Cerisier tardif	CET	756	0,6
	Chêne rouge	CHR	4 525	3,3
	Érable argenté	ERA	396	0,3
	Noyer cendré	NOC	29	0,0
	Peuplier baumier	PEB	1 419	1,0
	Peuplier à feuilles deltoïdes	PED	29	0,0
	Peuplier à grandes dents	PEG	5 864	4,3
	Peuplier faux tremble	PET	33 236	24,5
Feuillus tolérants (Ft)	Bouleau jaune	BOJ	22 906	17,0
	Caryer à fruits doux	CAF	1	0,0
	Chêne blanc	CHB	111	0,1
	Chêne bicolore	CHE	13	0,0
	Chêne à gros fruits	CHG	34	0,0
	Érable noir	ERN	20	0,0
	Érable rouge	ERR	42 317	31,4
	Érable à sucre	ERS	49 482	36,7
	Frêne d'Amérique	FRA	1 026	0,8
	Frêne noir	FRN	3 539	2,6
	Frêne de Pennsylvanie	FRP	73	0,1
	Hêtre à grandes feuilles	HEG	8 987	6,7
	Orme d'Amérique	ORA	751	0,6
	Orme rouge	ORR	10	0,0
	Orme de Thomas	ORT	13	0,0
	Ostryer de Virginie	OSV	3 210	2,4
	Tilleul d'Amérique	TIL	2 359	1,7
Résineux intolérants (Ri)	Mélèze laricin	MEL	2 117	6,2
	Pin gris	PIG	31 446	91,9
	Pin rouge	PIR	654	1,9
Résineux tolérants (Rt)	Épinette blanche	EPB	25 958	8,7
	Épinette noire	EPN	230 693	77,6
	Épinette de Norvège	EPO	12	0,0
	Épinette rouge	EPR	6 939	2,3
	Pin blanc	PIB	5 209	1,8
	Pruche de l'Est	PRU	5 431	1,8
	Thuya occidental	THO	23 121	7,8
Sapin baumier (Sab)	Sapin baumier	SAB	194 275	100,0

* Code des espèces végétales utilisé dans les inventaires forestiers du MRNF.

Annexe 2. Principales caractéristiques dendrométriques mesurées au début des segments d'évolution des placettes retenues pour étalonner le modèle, par sous-domaine bioclimatique (Sdom) (n : nombre de mesures, moy : moyenne, min : minimum, max : maximum, âge : âge moyen des arbres codominants et dominants, Δt : nombre d'années entre deux mesurages, TBE : indice de réduction de croissance due à la tordeuse des bourgeons de l'épinette, Fi : feuillus intolérants, Ft : feuillus tolérants, Ri : résineux intolérants, Rt : résineux tolérants, Sab : sapin baumier)

	Âge (années)				Δt (années)				Hauteur dominante (m)				Indice de régularité de Shannon				TBE			
Sdom	n	moy	min	max	n	moy	min	max	n	moy	min	max	n	moy	min	max	n	moy	min	max
1	219	56,3	22,6	120,9	233	9,3	4,8	16,2	200	18,8	8,7	30,0	233	0,77	0,24	1,05	233	0,3	0	3,0
2est	363	54,1	14,5	119,6	376	8,5	4,5	12,8	345	17,1	7,1	26,6	376	0,76	0	1,00	376	0,2	0	1,6
2ouest	399	60,5	11,6	127,8	449	9,9	3,4	32,3	375	18,7	7,0	31,8	449	0,81	0,24	1,03	449	0,6	0	4,3
3est	1185	58,4	12,0	132,9	1253	9,4	4,8	13,3	1102	17,6	5,6	26,5	1253	0,79	0	1,04	1253	0,9	0	3,8
3ouest	1997	70,5	15,8	197,9	2140	9,7	2,9	24,9	1794	19,4	8,2	30,0	2140	0,80	0	1,06	2140	0,7	0	3,1
4est	816	52,5	12,8	136,3	873	9,1	2,4	17,0	774	15,7	6,3	24,5	873	0,75	0	1,04	873	0,8	0	4,4
4ouest	2484	61,7	13,5	168,0	2610	10,1	3,9	19,3	2277	16,8	6,5	27,2	2610	0,74	0	1,02	2610	1,1	0	4,7
5est	1021	62,4	14,0	185,5	1046	9,3	4,0	19,1	966	14,1	6,5	27,2	1046	0,72	0	1,04	1046	1,0	0	5,1
5ouest	1015	57,2	13,7	173,8	1042	9,9	4,2	19,0	967	15,5	6,9	26,2	1042	0,68	0	0,98	1042	0,8	0	4,3
6est	1978	115,6	24,7	219,1	2005	11,9	4,3	24,1	1882	13,2	5,8	23,0	2005	0,68	0	1,04	2005	0,1	0	4,4
6ouest	1157	92,9	18,7	228,4	1185	9,3	4,1	18,3	1090	14,1	6,0	26,2	1188	0,61	0	0,99	1188	0,2	0	2,1

	Nombre de tiges marchandes (tiges·ha^{-1})																							
	Total				Fi				Ft				Ri				Rt				Sab			
Sdom	n	moy	min	max	n	moy	min	max	n	moy	min	max	n	moy	min	max	n	moy	min	max	n	moy	min	max
1	233	784	50	1975	187	236	0	1275	218	366	0	1475	21	208	25	1350	146	259	0	1600	101	165	0	1100
2est	376	866	50	2700	194	201	0	1375	357	429	0	1200	28	135	25	500	246	284	0	2575	232	259	0	1150
2ouest	449	763	50	2125	350	209	0	1275	417	403	0	1200	25	83	0	375	256	249	0	1875	203	178	0	1250
3est	1253	816	25	2525	806	208	0	1250	1080	347	0	1250	28	70	0	525	829	235	0	2525	963	293	0	2425
3ouest	2140	680	25	2275	1341	229	0	1600	1864	323	0	1275	171	100	0	1250	1451	199	0	2275	1399	172	0	1350
4est	873	941	25	2775	692	310	0	1750	560	226	0	1150	45	522	0	2075	681	261	0	2775	733	381	0	2575
4ouest	2610	725	25	2600	1987	264	0	1950	1401	180	0	925	361	295	0	1950	2105	286	0	2600	1951	209	0	1750
5est	1046	1097	25	3400	777	274	0	1650	147	126	0	650	31	167	0	1450	938	331	0	3025	954	630	0	3250
5ouest	1042	881	25	2975	753	347	0	2250	107	96	0	650	365	412	0	2250	907	384	0	2750	587	253	0	1550
6est	2005	1026	25	3975	489	204	0	1725	0				211	110	0	1075	1983	656	0	3250	1569	403	0	3950
6ouest	1188	955	25	3125	280	213	0	1825	0				420	341	0	1825	1164	750	0	2975	319	183	0	1800

Annexe 2 (suite)

Surface terrière marchande ($m^2 \cdot ha^{-1}$)

	Total				Fi				Ft				Ri				Rt				Sab			
Sdom	n	moy	min	max	n	moy	min	max	n	moy	min	max	n	moy	min	max	n	moy	min	max	n	moy	min	max
1	233	21,1	1,0	56,7	187	7,2	0	42,5	218	9,4	0	42,9	21	4,9	0,6	22,0	146	7,9	0	45,4	101	2,6	0	18,2
2est	376	20,8	0,4	52,9	194	3,7	0	22,1	357	12,3	0	52,9	28	3,8	0,9	9,9	246	6,5	0	42,4	232	4,3	0	31,5
2ouest	449	21,9	1,2	59,9	350	6,9	0	35,5	417	10,9	0	36,2	25	1,7	0	6,4	256	8,7	0	53,2	203	2,9	0	26,5
3est	1253	21,7	0,2	55,5	806	4,9	0	32,9	1080	11,6	0	40,6	28	1,7	0	7,1	829	6,5	0	55,5	963	5,4	0	33,4
3ouest	2140	21,7	0,4	60,0	1341	7,1	0	33,4	1864	11,5	0	47,7	171	4,2	0	27,1	1451	7,4	0	56,1	1399	2,9	0	21,6
4est	873	20,2	0,2	59,0	692	6,1	0	38,0	560	6,3	0	45,6	45	8,7	0	32,9	681	6,3	0	51,0	733	7,1	0	38,4
4ouest	2610	17,9	0,4	50,9	1987	6,7	0	35,6	1401	7,4	0	38,3	361	6,9	0	35,0	2105	6,4	0	40,1	1951	3,7	0	33,2
5est	1046	20,6	0,2	52,5	777	4,9	0	28,6	147	3,6	0	19,1	31	3,0	0	17,4	938	6,8	0	44,7	954	11,2	0	48,2
5ouest	1042	16,7	0,2	43,9	753	7,8	0	33,4	107	2,8	0	15,8	365	7,2	0	31,8	907	6,5	0	43,8	587	4,5	0	28,8
6est	2005	17,4	0,2	56,4	489	4,0	0	31,8	0				211	1,7	0	15,3	1983	11,0	0	47,3	1569	6,9	0	55,8
6ouest	1188	15,8	0,2	52,0	280	5,4	0	36,4	0				420	5,1	0	26,8	1164	12,0	0	44,0	319	3,3	0	31,8

Volume marchand ($m^3 \cdot ha^{-1}$)

	Total				Fi				Ft				Ri				Rt				Sab			
Sdom	n	moy	min	max	n	moy	min	max	n	moy	min	max	n	moy	min	max	n	moy	min	max	n	moy	min	max
1	227	144,0	4,6	520,7	182	54,1	0	440,0	212	63,4	0	428,8	19	33,8	3,1	182,5	143	52,2	0	286,3	99	13,1	0	114,9
2est	376	123,1	0,7	468,0	194	20,7	0	148,7	357	80,0	0	468,0	28	24,3	4,9	65,1	246	33,4	0	197,0	232	20,8	0	209,6
2ouest	445	144,5	3,8	429,2	349	49,8	0	375,0	413	72,8	0	354,4	25	9,4	0	45,2	255	53,6	0	322,5	203	14,6	0	206,4
3est	1219	130,5	0,3	435,1	789	30,0	0	226,2	1048	76,4	0	369,9	28	10,5	0	50,7	807	36,8	0	424,9	935	27,2	0	185,9
3ouest	2113	149,7	1,6	470,8	1329	50,8	0	319,1	1838	83,1	0	470,8	171	32,9	0	277,9	1436	49,3	0	384,4	1383	14,1	0	126,2
4est	873	109,9	0,3	407,5	692	35,3	0	327,7	560	38,7	0	407,5	45	47,3	0	202,4	681	32,8	0	320,4	733	34,7	0	253,3
4ouest	2606	110,5	0,8	497,5	1984	43,6	0	287,3	1400	52,5	0	328,7	359	47,3	0	321,9	2102	35,6	0	378,0	1949	18,6	0	181,1
5est	1043	99,9	0,2	330,6	777	24,5	0	222,4	145	20,4	0	127,5	31	15,7	0	128,3	935	34,4	0	254,7	952	52,1	0	290,8
5ouest	1039	92,4	0,3	305,5	750	48,4	0	261,2	106	17,7	0	119,0	364	41,4	0	240,1	905	33,0	0	247,6	585	22,0	0	191,5
6est	2004	78,5	0,3	341,9	488	21,1	0	223,0	0				211	7,0	0	70,6	1982	49,8	0	278,8	1569	29,9	0	279,8
6ouest	1180	78	0,2	398,6	274	35,8	0	368,9	0				418	25,4	0	193,9	1156	57,5	0	289,2	314	16,1	0	223,5

Annexe 2 (suite et fin)

	Diamètre moyen quadratique (cm)																							
	Total				Fi				Ft				Ri				Rt				Sab			
Sdom	n	moy	min	max	n	moy	min	max	n	moy	min	max	n	moy	min	max	n	moy	min	max	n	moy	min	max
1	233	18,9	10,5	39,3	180	20,5	9,1	58,1	211	17,3	9,7	42,7	21	19,6	12,4	33,7	139	19,5	9,1	52,1	89	13,1	9,1	21,7
2est	376	18,1	9,4	43,2	183	15,8	9,1	38,1	339	18,6	9,3	43,2	28	22,6	10,7	39,5	238	17,8	9,1	46,0	219	14,9	9,3	34,4
2ouest	449	19,2	11,0	33,7	339	21,1	9,2	49,5	398	17,3	9,1	33,7	23	17,5	10,9	26,0	243	21,7	9,6	50,3	180	14,2	9,1	31,2
3est	1253	19,0	9,6	40,8	769	17,8	9,1	48,2	1054	20,2	9,1	45,7	24	21,2	9,5	47,7	800	19,4	9,1	64,1	925	15,4	9,1	40,2
3ouest	2140	20,8	10,7	50,4	1291	21,7	9,1	60,4	1797	20,1	9,1	50,4	164	24,6	9,5	55,2	1401	22,3	9,1	77,8	1291	14,5	9,1	33,6
4est	873	17,1	9,6	38,4	665	15,4	9,2	32,5	518	17,2	9,1	38,4	39	16,5	9,8	51,1	649	18,2	9,2	95,4	692	15,3	9,2	34,6
4ouest	2610	18,6	10,1	45,3	1908	19,2	9,1	73,0	1310	21,1	9,1	65,1	340	20,3	9,2	57,2	2042	19,0	9,1	86,9	1786	15,1	9,1	39,1
5est	1046	15,8	9,5	38,2	738	15,7	9,1	47,9	137	17,8	9,3	50,3	26	18,6	9,3	40,9	901	17,3	9,1	44,8	913	15,2	9,1	33,0
5ouest	1042	15,9	9,3	32,5	729	17,5	9,1	41,0	97	18,6	9,1	44,4	353	17,4	9,1	49,9	859	15,7	9,1	46,1	542	14,8	9,2	30,3
6est	2005	14,5	9,4	28,3	479	16,3	9,1	44,0	0				192	14,1	9,1	38,7	1977	15,0	9,1	48,7	1534	14,1	9,1	37,8
6ouest	1188	14,3	9,1	34,8	267	16,8	9,1	37,6	0				408	14,9	9,2	30,8	1148	14,2	9,1	35,5	302	14,1	9,1	36,4

Annexe 3. Équations de prévision du changement temporel du nombre de tiges marchandes, et valeurs estimées des paramètres

$$NFi_{2,ij} = \exp\left(a_{1,sd} + a_{2,sd}\ln\left(NFi_{1,ij}\right) + a_3\Delta t_{ij} + a_4 Hd_{1,ij} + a_5 Age_{1,ij} \times StFi_{1,ij}/StTot_{1,ij} + a_6\ln\left(NFi_{1,ij}\right) \times Age_{1,ij} + a_7 TBE_{ij}\right)$$

$$NFt_{2,ij} = \exp\left(b_{1,sd} + b_{2,sd}\ln\left(NFt_{1,ij}\right) + b_3\Delta t_{ij} + b_4 Hd_{1,ij} + b_5/Age_{1,ij}\right)$$

$$NRi_{2,ij} = \exp\left(c_{1,sd} + c_{2,sd}\ln\left(NRi_{1,ij}\right) + c_3\Delta t_{ij} + c_4 Hd_{1,ij} + c_5\ln\left(NRi_{1,ij}\right) \times Age_{1,ij} + c_{6,sd}\ln\left(NRi_{1,ij}\right) \times Perturb_{ij}\right)$$

$$NRt_{2,ij} = \exp\left(d_{1,sd} + d_{2,sd}\ln\left(NRt_{1,ij}\right) + d_3\Delta t_{ij} + d_4 Hd_{1,ij} + d_{5,sd}\ln\left(NRt_{1,ij}\right)/Age_{1,ij} + d_{6,sd}\ln\left(NRt_{1,ij}\right) \times Perturb_{ij} + d_7 TBE_{ij}\right)$$

$$NSab_{2,ij} = \exp\left(e_{1,sd} + e_{2,sd}\ln\left(NSab_{1,ij}\right) + e_3\Delta t_{ij} + e_{4,sd} Hd_{1,ij} + e_{5,sd}\ln\left(NSab_{1,ij}\right) \times Age_{1,ij} + e_{6,sd}\ln\left(NSab_{1,ij}\right)/Age_{1,ij} + e_{7,sd}\ln\left(NSab_{1,ij}\right) \times TBE_{ij}\right)$$

où

$NFi_{1,ij}, NFt_{1,ij}, NRi_{1,ij}, NRt_{1,ij}, NSab_{1,ij}$:	Nombre de tiges marchandes des groupes d'espèces Fi, Ft, Ri, Rt, Sab, respectivement, de la placette *i* au début de l'intervalle *j* (tiges·400 m^{-2})
$NFi_{2,ij}, NFt_{2,ij}, NRi_{2,ij}, NRt_{2,ij}, NSab_{2,ij}$:	Nombre de tiges marchandes des groupes d'espèces Fi, Ft, Ri, Rt, Sab, respectivement, de la placette *i* à la fin de l'intervalle *j* (tiges·400 m^{-2})
$Hd_{1,ij}$:	Hauteur dominante de la placette *i* au début de l'intervalle *j* (m)
$Age_{1,ij}$:	Âge moyen des arbres codominants et dominants de la placette *i* au début de l'intervalle *j* (années)
$StFi_{1,ij}$:	Surface terrière marchande du groupe d'espèces Fi de la placette *i* au début de l'intervalle *j* (m^2·ha^{-1})
$StTot_{1,ij}$:	Surface terrière marchande totale de la placette *i* au début de l'intervalle *j* (m^2·ha^{-1})
Δt_{ij} :	Nombre d'années dans l'intervalle *j* de la placette *i*
TBE_{ij} :	Indice de réduction de la croissance due à la tordeuse du bourgeon de l'épinette durant l'intervalle *j* de la placette *i* (indice continu entre 0 et 5, où 0 = aucune réduction de croissance et 5 = forte réduction de croissance)
$Perturb_{ij}$:	Variable binaire indiquant une perturbation naturelle légère (chablis partiel, brûlis partiel ou dépérissement partiel) durant l'intervalle *j* de la placette *i*
ln :	Logarithme naturel

Annexe 3 (suite)

Valeurs estimées des paramètres

NFi_2				NFi_1				NRi_2			
Coefficient	Sous-domaine	Paramètre (erreur-type)	Valeur de t*	Coefficient	Sous-domaine	Paramètre (erreur-type)	Valeur de t*	Coefficient	Sous-domaine	Paramètre (erreur-type)	Valeur de t*
$a_{1,sd}$	1	0,9828 (0,0976)	10,1	$b_{1,sd}$	1	0,9447 (0,0494)	19,1	$c_{1,sd}$	1-2-3**	0,8712 (0,0443)	19,7
	2est	0,5036 (0,1015)	5,0		2est	0,9625 (0,0421)	22,9		4est-4ouest	0,9254 (0,0229)	40,4
	2ouest	0,8376 (0,0767)	10,9		2ouest	0,8631 (0,0458)	18,9		5est-5ouest	0,8637 (0,0214)	40,4
	3est	0,7696 (0,0504)	15,3		3est	0,7325 (0,0310)	23,6		6est-6ouest	0,6658 (0,0240)	27,8
	3ouest	0,8973 (0,0406)	22,1		3ouest	0,7983 (0,0285)	28,0	$c_{2,sd}$	1-2-3**	0,9969 (0,0128)	77,6
	4est	0,9395 (0,0423)	22,2		4est	0,6636 (0,0381)	17,4		4est-4ouest	0,9795 (0,0058)	168,4
	4ouest	1,0119 (0,0288)	35,2		4ouest	0,6726 (0,0338)	19,9		5est-5ouest	0,9988 (0,0053)	188,4
	5est	0,9398 (0,0388)	24,2		5est	0,6180 (0,0887)	7,0		6est-6ouest	1,0065 (0,0065)	155,2
	5ouest	0,9456 (0,0348)	27,2		5ouest	0,6634 (0,1060)	6,3	c_3		-0,0041 (0,0004)	-9,3
	6est	0,2663 (0,0669)	4,0	$b_{2,sd}$	1	0,7986 (0,0143)	55,7	c_4		-0,0417 (0,0008)	-52,9
	6ouest	0,4699 (0,0816)	5,8		2est	0,7744 (0,0122)	63,5	c_5		-0,0010 (0,0000)	-23,2
$a_{2,sd}$	1	0,8749 (0,0305)	28,6		2ouest	0,8055 (0,0134)	60,0	$c_{6,sd}$	1-2-3-5***	0	
	2est	1,0125 (0,0298)	34,0		3est	0,8377 (0,0084)	99,9		4est-4ouest	-0,1043 (0,0077)	-13,6
	2ouest	0,9364 (0,0249)	37,6		3ouest	0,8212 (0,0076)	107,9		6est-6ouest	-0,1512 (0,0079)	-19,1
	3est	0,9766 (0,0152)	64,1		4est	0,8709 (0,0114)	76,7				
	3ouest	0,9285 (0,0113)	82,1		4ouest	0,8406 (0,0108)	77,8				
	4est	0,9135 (0,0123)	74,4		5est	0,8896 (0,0344)	25,9				
	4ouest	0,9057 (0,0078)	115,4		5ouest	0,8223 (0,0425)	19,4				
	5est	0,9223 (0,0107)	86,0	b_3		-0,0011 (0,0006)	-1,9				
	5ouest	0,9247 (0,0092)	100,7	b_4		-0,0174 (0,0008)	-22,4				
	6est	1,1304 (0,0174)	65,1	b_5		5,9266 (0,3582)	16,5				
	6ouest	1,0545 (0,0232)	45,4								
a_3		-0,0091 (0,0007)	-13,8								
a_4		-0,0246 (0,0010)	-24,5								
a_5		0,0016 (0,0003)	5,9								
a_6		-0,0019 (0,0001)	-22,9								
a_7		0,0263 (0,0021)	12,3								

* Valeur de la statistique t de Student.
** Sous-domaines 1, 2est, 2ouest, 3est, 3ouest.
*** Sous-domaines 1, 2est, 2ouest, 3est, 3ouest, 5est, 5ouest.

Annexe 3 (suite et fin)

Valeurs estimées des paramètres (suite)

NRt_2				$NSab_1$				$NSab_2$ (suite)			
Coefficient	Sous-domaine	Paramètre (erreur-type)	Valeur de t*	Coefficient	Sous-domaine	Paramètre (erreur-type)	Valeur de t*	Coefficient	Sous-domaine	Paramètre (erreur-type)	Valeur de t*
$d_{1,sd}$	1	0,7314 (0,0495)	14,8	$e_{1,sd}$	1	1,2086 (0,4240)	2,9	$e_{5,sd}$	1-2-3o-4o-5o-6o†††	0	
	2est	0,6733 (0,0376)	17,9		2est	1,6102 (0,1659)	9,7		3est	-0,0015 (0,0003)	-6,0
	2ouest	0,6729 (0,0479)	14,0		2ouest	1,2201 (0,2565)	4,8		4est	-0,0011 (0,0002)	-5,5
	3est	0,7140 (0,0357)	20,0		3est	1,3999 (0,0895)	15,6		5est	-0,0013 (0,0001)	-13,9
	3ouest	0,6869 (0,0427)	16,1		3ouest	1,5833 (0,1428)	11,1		6est	-0,0008 (0,0001)	-11,4
	4est	0,6842 (0,0364)	18,8		4est	1,4613 (0,0713)	20,5	$e_{6,sd}$	1-2o-3e-4e-5-6‡	0	
	4ouest	0,9045 (0,0246)	36,8		4ouest	1,2989 (0,1065)	12,2		2est	2,8176 (1,1050)	2,5
	5est	0,5455 (0,0218)	25,0		5est	1,2559 (0,0508)	24,7		3ouest	2,2695 (1,1070)	2,1
	5ouest	0,9268 (0,0254)	36,5		5ouest	1,3100 (0,1238)	10,6		4ouest	10,2689 (0,7350)	14,0
	6est	0,5801 (0,0215)	27,0		6est	0,4581 (0,0501)	9,1	$e_{7,sd}$	1-2est-6ouest	0	
	6ouest	0,5692 (0,0305)	18,7		6ouest	0,6484 (0,2182)	3,0		2ouest	-0,0762 (0,0194)	-3,9
$d_{2,sd}$	1-2o-3o**	0,9305 (0,0119)	77,9	$e_{2,sd}$	1	0,7616 (0,0765)	10,0		3est	-0,0548 (0,0039)	-14,1
	2e-3e-4e***	0,9204 (0,0090)	102,0		2est	0,7446 (0,0471)	15,8		3ouest	-0,1685 (0,0107)	-15,8
	4ouest-5ouest	0,8357 (0,0064)	130,5		2ouest	0,8726 (0,0563)	15,5		4est	-0,0475 (0,0024)	-19,9
	5est-6est	0,9029 (0,0059)	152,2		3est	0,9013 (0,0184)	49,1		4ouest	-0,1190 (0,0056)	-21,4
	6ouest	0,9055 (0,0079)	115,1		3ouest	0,7290 (0,0387)	18,9		5est	-0,0272 (0,0011)	-25,1
d_3		0,0040 (0,0005)	8,7		4est	0,8770 (0,0151)	57,9		5ouest	-0,0689 (0,0064)	-10,8
d_4		-0,0285 (0,0007)	-37,9		4ouest	0,4915 (0,0266)	18,5		6est	-0,0262 (0,0041)	-6,4
$d_{5,sd}$	1 à 4est†	0,4394 (0,1982)	2,2		5est	0,9575 (0,0104)	92,5				
	4ouest-5ouest	2,3902 (0,1558)	15,3		5ouest	0,8121 (0,0258)	31,5				
	5est-6est	3,6509 (0,1377)	26,5		6est	0,9871 (0,0095)	104,2				
	6ouest	3,4750 (0,1655)	21,0		6ouest	0,8428 (0,0398)	21,2				
$d_{6,sd}$	1-2††	0		e_3		-0,0037 (0,0012)	-3,0				
	3est	-0,0940 (0,0315)	-3,0	$e_{4,sd}$	1	-0,0337 (0,0180)	-1,9				
	3ouest	-0,0788 (0,0287)	-2,7		2est	-0,0576 (0,0085)	-6,8				
	4est	-0,0922 (0,0084)	-11,0		2ouest	-0,0375 (0,0117)	-3,2				
	4ouest	-0,0633 (0,0085)	-7,4		3est	-0,0418 (0,0044)	-9,5				
	5est	-0,1249 (0,0103)	-12,1		3ouest	-0,0464 (0,0071)	-6,5				
	5ouest	-0,0320 (0,0093)	-3,4		4est	-0,0450 (0,0035)	-12,9				
	6est	-0,0350 (0,0045)	-7,7		4ouest	-0,0225 (0,0060)	-3,7				
	6ouest	-0,0479 (0,0047)	-10,3		5est	-0,0515 (0,0022)	-23,4				
d_7		-0,0325 (0,0023)	-14,2		5ouest	-0,0385 (0,0056)	-6,9				
					6est	-0,0087 (0,0026)	-3,4				
					6ouest	-0,0185 (0,0106)	-1,7				

* Valeur de la statistique t de Student.
** Sous-domaines 1, 2ouest, 3ouest.
*** Sous-domaines 2est, 3est, 4est.
† Sous-domaines 1, 2est, 2ouest, 3est, 3ouest, 4est.
†† Sous-domaines 1, 2est, 2ouest.
††† Sous-domaines 1, 2est, 2ouest, 3ouest, 4ouest, 5ouest, 6ouest.
‡ Sous-domaines 1, 2ouest, 3est, 4est, 5est, 5ouest, 6est, 6ouest.

Annexe 4. Équations de prévision du changement temporel de la surface terrière marchande, et valeurs estimées des paramètres

$$StFi_{2,ij} = \exp\left(a_{1,sd} + a_{2,sd}\ln\left(StFi_{1,ij}\right) + a_3\Delta t_{ij} + a_4\ln\left(NFi_{1,ij}\right) + a_{5,sd}/Age_{1,ij} + a_6\,StFi_{1,ij}/StTot_{1,ij} + a_7\ln\left(StFi_{1,ij}\right)\times Perturb_{ij} + a_8\ln\left(StFi_{1,ij}\right)\times TBE_{ij}\right)$$

$$StFt_{2,ij} = \exp\left(b_{1,sd} + b_2\ln\left(StFt_{1,ij}\right) + b_3\Delta t_{ij} + b_4\ln\left(NFt_{1,ij}\right) + b_5 Age_{1,ij} + b_6\ln\left(StFt_{1,ij}\right)\times Age_{1,ij} + b_7\,StFt_{1,ij}/StTot_{1,ij}\right)$$

$$StRi_{2,ij} = \exp\left(c_{1,sd} + c_{2,sd}\ln\left(StRi_{1,ij}\right) + c_3\Delta t_{ij} + c_{4,sd}\ln\left(NRi_{1,ij}\right) + c_{5,sd}Hd_{1,ij} + c_{6,sd}/Age_{1,ij} + c_7\,StRi_{1,ij}/StTot_{1,ij} + c_{8,sd}Pir_i + c_{9,sd}\,Pir_i/Age_{1,ij} + c_{10,sd}\ln\left(StRi_{1,ij}\right)\times Perturb_{ij} + c_{11,Dr}\right)$$

$$StRt_{2,ij} = \exp\left(d_{1,sd} + d_{2,sd}\ln\left(StRt_{1,ij}\right) + d_3\Delta t_{ij} + d_4\ln\left(NRt_{1,ij}\right) + d_{5,sd}Hd_{1,ij} + d_{6,sd}/Age_{1,ij} + d_7 Epx_i\times\ln\left(StRt_{1,ij}\right) + d_{8,sd}\ln\left(StRt_{1,ij}\right)\times Perturb_{ij} + d_9\ln\left(StRt_{1,ij}\right)\times TBE_{ij}\right)$$

$$StSab_{2,ij} = \exp\left(e_{1,sd} + e_{2,sd}\ln\left(StSab_{1,ij}\right) + e_3\Delta t_{ij} + e_4\ln\left(NSab_{1,ij}\right) + e_5Hd_{1,ij} + e_6\ln\left(StSab_{1,ij}\right)/Age_{1,ij} + e_7\,StSab_{1,ij}/StTot_{1,ij} + e_8\ln\left(StSab_{1,ij}\right)\times TBE_{ij}\right)$$

où

$StFi_{1,ij}, StFt_{1,ij}, StRi_{1,ij}, StRt_{1,ij}, StSab_{1,ij}$:	Surface terrière marchande des groupes d'espèces Fi, Ft, Ri, Rt, Sab, respectivement, de la placette *i* au début de l'intervalle *j* ($m^2 \cdot ha^{-1}$)
$StFi_{2,ij}, StFt_{2,ij}, StRi_{2,ij}, StRt_{2,ij}, StSab_{2,ij}$:	Surface terrière marchande des groupes d'espèces Fi, Ft, Ri, Rt, Sab, respectivement, de la placette *i* à la fin de l'intervalle *j* ($m^2 \cdot ha^{-1}$)
$NFi_{1,ij}, NFt_{1,ij}, NRi_{1,ij}, NRt_{1,ij}, NSab_{1,ij}$:	Nombre de tiges marchandes des groupes d'espèces Fi, Ft, Ri, Rt, Sab, respectivement, de la placette *i* au début de l'intervalle *j* (tiges·400 m^{-2})
$Hd_{1,ij}$:	Hauteur dominante de la placette *i* au début de l'intervalle *j* (m)
$Age_{1,ij}$:	Âge moyen des arbres codominants et dominants de la placette *i* au début de l'intervalle *j* (années)
$StTot_{1,ij}$:	Surface terrière marchande totale de la placette *i* au début de l'intervalle *j* ($m^2 \cdot ha^{-1}$)
Δt_{ij} :	Nombre d'années dans l'intervalle *j* de la placette *i*
TBE_{ij} :	Indice de réduction de la croissance due à la tordeuse du bourgeon de l'épinette durant l'intervalle *j* de la placette *i* (indice continu entre 0 et 5, où 0 = aucune réduction de croissance et 5 = forte réduction de croissance)
$Perturb_{ij}$:	Variable binaire indiquant une perturbation naturelle légère (chablis partiel, brûlis partiel ou dépérissement partiel) durant l'intervalle *j* de la placette *i*
Epx_i :	Variable binaire indiquant que la surface terrière de l'épinette blanche, de l'épinette rouge, du thuya ou de la pruche représente plus de 50 % de la surface terrière de la placette *i* au premier mesurage
Pir_i :	Variable binaire indiquant que la surface terrière du pin rouge représente plus de 20 % de la surface terrière de la placette *i* au premier mesurage
ln :	Logarithme naturel

Annexe 4 (suite)

Valeurs estimées des paramètres

$StFi_2$					$StFi_3$					$StRi_3$				
Coefficient	Sous-domaine	Paramètre (erreur-type)		Valeur de t*	Coefficient	Sous-domaine	Paramètre (erreur-type)		Valeur de t*	Coefficient	Sous-domaine	Paramètre (erreur-type)		Valeur de t*
$a_{1,sd}$	1	-0,0247	(0,0733)	-0,3	$b_{1,sd}$	1	0,6308	(0,0264)	23,9	$c_{1,sd}$	1-2-3**	0,2587	(0,0520)	5,0
	2est	-0,3303	(0,0999)	-3,3		2est	0,6321	(0,0261)	24,2		4est-4ouest	0,2042	(0,0288)	7,1
	2ouest	0,0918	(0,0569)	1,6		2ouest	0,5640	(0,0264)	21,4		5est-5ouest	0,2393	(0,0304)	7,9
	3est	-0,1274	(0,0447)	-2,8		3est	0,6093	(0,0257)	23,7		6est-6ouest	-0,2928	(0,0346)	-8,5
	3ouest	0,0341	(0,0304)	1,1		3ouest	0,5880	(0,0258)	22,8	$c_{2,sd}$	1-2-3**	0,9015	(0,0106)	85,4
	4est	-0,1002	(0,0418)	-2,4		4est	0,6466	(0,0259)	25,0		4est-4ouest	0,8788	(0,0092)	95,5
	4ouest	0,0670	(0,0250)	2,7		4ouest	0,5847	(0,0256)	22,8		5est-5ouest	0,8747	(0,0093)	94,1
	5est	-0,0611	(0,0449)	-1,4		5est	0,6400	(0,0306)	20,9		6est-6ouest	0,9245	(0,0089)	103,7
	5ouest	0,0954	(0,0337)	2,8		5ouest	0,5743	(0,0356)	16,1	c_3		0,0094	(0,0004)	25,6
	6est	-0,5758	(0,0676)	-8,5	b_2		0,6747	(0,0090)	75,2	$c_{4,sd}$	1 à 5***	0,0269	(0,0050)	5,4
	6ouest	-0,3283	(0,0777)	-4,2	b_3		0,0071	(0,0004)	16,2		6est-6ouest	0		
$a_{2,sd}$	1	0,9081	(0,0199)	45,6	b_4		0,0675	(0,0037)	18,1	$c_{5,sd}$	1-2-3**	-0,0186	(0,0021)	-9,0
	2est	0,9179	(0,0308)	29,8	b_5		-0,0037	(0,0004)	-10,2		4est-4ouest	-0,0092	(0,0013)	-7,1
	2ouest	0,8584	(0,0164)	52,4	b_6		0,0012	(0,0001)	10,0		5est-5ouest	-0,0119	(0,0016)	-7,6
	3est	0,8437	(0,0138)	61,2	b_7		0,2384	(0,0098)	24,4		6est-6ouest	0,0065	(0,0020)	3,2
	3ouest	0,8504	(0,0107)	79,8						$c_{6,sd}$	1-2-3**	13,2793	(0,8222)	16,2
	4est	0,8755	(0,0115)	76,0							4est-4ouest	10,2122	(0,3163)	32,3
	4ouest	0,8070	(0,0090)	89,8							5est-5ouest	10,4567	(0,4258)	24,6
	5est	0,8279	(0,0138)	60,2							6est-6ouest	14,8126	(0,8572)	17,3
	5ouest	0,8124	(0,0111)	73,0						c_7		0,1549	(0,0113)	13,7
	6est	0,9797	(0,0204)	48,1						$c_{8,sd}$	3est-3ouest	0,3590	(0,0244)	14,7
	6ouest	0,9950	(0,0226)	43,9							1-2, 4 à 6†	0		
a_3		0,0022	(0,0005)	4,4						$c_{9,sd}$	3est-3ouest	-10,3297	(0,9665)	-10,7
a_4		0,0507	(0,0048)	10,7							1-2, 4 à 6†	0		
$a_{5,sd}$	1	7,1723	(1,7393)	4,1						$c_{10,sd}$	1-2-3, 5††	0		
	2est	14,5266	(2,0697)	7,0							4est-4ouest	-0,1407	(0,0052)	-27,3
	2ouest	8,1005	(1,4634)	5,5							6est-6ouest	-0,1300	(0,0101)	-12,8
	3est	18,3471	(1,0852)	16,9						$c_{11,dr}$	drain 0-1†††	-0,1698	(0,0152)	-11,1
	3ouest	10,2237	(0,7982)	12,8							drain 2-3‡	-0,1260	(0,0120)	-10,5
	4est	12,9890	(0,9811)	13,2							drain 4‡‡	-0,1529	(0,0135)	-11,3
	4ouest	13,1967	(0,6981)	18,9							drain 5-6‡‡‡	0		
	5est	14,5155	(1,1543)	12,6										
	5ouest	11,4284	(0,7526)	15,2										
	6est	21,5238	(2,2267)	9,7										
	6ouest	7,2918	(2,2568)	3,2										
a_6		0,0915	(0,0133)	6,9										
a_7		-0,0744	(0,0056)	-13,2										
a_8		0,0051	(0,0007)	7,8										

* Valeur de la statistique t de Student.
** Sous-domaines 1, 2est, 2ouest, 3est, 3ouest.
*** Sous-domaines 1, 2est, 2ouest, 3est, 3ouest, 4est, 4ouest, 5est, 5ouest.
† Sous-domaines 1, 2est, 2ouest, 4est, 4ouest, 5est, 5ouest, 6est, 6ouest.
†† Sous-domaines 1, 2est, 2ouest, 3est, 3ouest, 5est, 5ouest.
††† Classes de drainage 0 et 1.
‡ Classes de drainage 2 et 3.
‡‡ Classe de drainage 4.
‡‡‡ Classes de drainage 5 et 6.

Annexe 4 (suite et fin)

Valeurs estimées des paramètres (suite)

$StRt_2$					$StSab_2$				
Coefficient	Sous-domaine	Paramètre (erreur-type)		Valeur de t*	Coefficient	Sous-domaine	Paramètre (erreur-type)		Valeur de t*
$d_{1,sd}$	1-2ouest	0,3528	(0,0629)	5,6	$e_{1,sd}$	1	0,2430	(0,1929)	1,3
	2est-3est-4est	0,2928	(0,0354)	8,3		2est	0,5736	(0,0904)	6,3
	3ouest	0,3329	(0,0420)	7,9		2ouest	0,6221	(0,1062)	5,9
	4ouest	0,4003	(0,0468)	8,5		3est	0,6420	(0,0556)	11,6
	5est	0,4018	(0,0496)	8,1		3ouest	0,3885	(0,0704)	5,5
	5ouest	0,5062	(0,0584)	8,7		4est	0,6017	(0,0518)	11,6
	6est	-0,2350	(0,0213)	-11,0		4ouest	0,4266	(0,0580)	7,4
	6ouest	-0,2384	(0,0312)	-7,6		5est	0,4442	(0,0449)	9,9
$d_{2,sd}$	1-2ouest	0,8522	(0,0132)	64,4		5ouest	0,4685	(0,0759)	6,2
	2est-3est-4est	0,8649	(0,0088)	97,7		6est	-0,0184	(0,0445)	-0,4
	3ouest	0,8570	(0,0099)	86,9		6ouest	-0,0148	(0,1196)	-0,1
	4ouest	0,8635	(0,0100)	86,3	$e_{2,sd}$	1	0,6134	(0,0810)	7,6
	5est	0,8447	(0,0108)	77,9		2est	0,5382	(0,0383)	14,1
	5ouest	0,8166	(0,0116)	70,7		2ouest	0,4543	(0,0466)	9,7
	6est	0,8919	(0,0075)	118,3		3est	0,5009	(0,0212)	23,7
	6ouest	0,8900	(0,0094)	94,3		3ouest	0,4641	(0,0308)	15,1
d_3		0,0109	(0,0004)	25,6		4est	0,5427	(0,0195)	27,9
d_4		0,0639	(0,0044)	14,6		4ouest	0,4104	(0,0235)	17,5
$d_{5,sd}$	1-2ouest	-0,0084	(0,0027)	-3,1		5est	0,5974	(0,0174)	34,3
	2est-3est-4est	-0,0085	(0,0015)	-5,5		5ouest	0,4858	(0,0302)	16,1
	3ouest	-0,0087	(0,0018)	-4,7		6est	0,7351	(0,0190)	38,8
	4ouest	-0,0213	(0,0020)	-10,4		6ouest	0,6921	(0,0446)	15,5
	5est	-0,0249	(0,0025)	-10,0	e_3		0,0044	(0,0012)	3,8
	5ouest	-0,0252	(0,0029)	-8,6	e_4		0,1488	(0,0116)	12,8
	6est-6ouest	0			e_5		-0,0113	(0,0018)	-6,4
$d_{6,sd}$	1 à 4est**	3,8093	(0,5344)	7,1	e_6		4,5857	(0,2257)	20,3
	4ouest	7,3877	(0,8172)	9,0	e_7		0,2798	(0,0288)	9,7
	5est	11,5443	(1,0499)	11,0	e_8		-0,0458	(0,0012)	-39,5
	5ouest	11,0599	(1,0610)	10,4					
	6est	23,7723	(0,7323)	32,5					
	6ouest	19,7653	(0,8449)	23,4					
d_7		0,0201	(0,0020)	10,1					
$d_{8,sd}$	1-2est-2ouest	0							
	3est	-0,0674	(0,0237)	-2,8					
	3ouest	-0,0592	(0,0151)	-3,9					
	4est	-0,0798	(0,0095)	-8,4					
	4ouest	-0,0894	(0,0107)	-8,3					
	5est	-0,1336	(0,0111)	-12,1					
	5ouest	-0,0276	(0,0104)	-2,7					
	6est	-0,0735	(0,0051)	-14,3					
	6ouest	-0,0802	(0,0049)	-16,4					
d_9		-0,0120	(0,0007)	-17,8					

* Valeur de la statistique t de Student.
** Sous-domaines 1, 2est, 2ouest, 3est, 3ouest, 4est.

Annexe 5. Équations de prévision du changement temporel du volume marchand, et valeurs estimées des paramètres

$$VFi_{2,ij} = \exp\left(a_{1,sd} + a_2 \ln\left(VFi_{1,ij}\right) + a_3 \Delta t_{ij} + a_4 \ln\left(NFi_{2,ij}\right) + a_{5,sd} \ln\left(StFi_{2,ij}\right) + a_6 Hd_{2,ij} + a_7 / (Age_{1,ij} + \Delta t_{ij})\right)$$

$$VFt_{2,ij} = \exp\left(b_{1,sd} + b_2 \ln\left(VFt_{1,ij}\right) + b_3 \Delta t_{ij} + b_4 \ln\left(NFt_{2,ij}\right) + b_{5,sd} \ln\left(StFt_{2,ij}\right) + b_6 Hd_{2,ij} + b_7 / (Age_{1,ij} + \Delta t_{ij})\right)$$

$$VRi_{2,ij} = \exp\left(c_{1,sd} + c_2 \ln\left(VRi_{1,ij}\right) + c_3 \Delta t_{ij} + c_4 \ln\left(NRi_{2,ij}\right) + c_{5,sd} \ln\left(StRi_{2,ij}\right) + c_6 Hd_{2,ij} + c_7 \left(Age_{1,ij} + \Delta t_{ij}\right)\right)$$

$$VRt_{2,ij} = \exp\left(d_{1,sd} + d_2 \ln\left(VRt_{1,ij}\right) + d_3 \Delta t_{ij} + d_4 \ln\left(NRt_{2,ij}\right) + d_{5,sd} \ln\left(StRt_{2,ij}\right) + d_6 Hd_{2,ij} + d_7 \left(Age_{1,ij} + \Delta t_{ij}\right)\right)$$

$$VSab_{2,ij} = \exp\left(e_{1,sd} + e_2 \ln\left(VSab_{1,ij}\right) + e_3 \Delta t_{ij} + e_4 \ln\left(NSab_{2,ij}\right) + e_{5,sd} \ln\left(StSab_{2,ij}\right) + e_6 Hd_{2,ij} + e_7 \left(Age_{1,ij} + \Delta t_{ij}\right)\right)$$

où

$VFi_{1,ij}$, $VFt_{1,ij}$, $VRi_{1,ij}$, $VRt_{1,ij}$, $VSab_{1,ij}$:	Volume marchand des groupes d'espèces Fi, Ft, Ri, Rt, Sab, respectivement, de la placette *i* au début de l'intervalle *j* ($m^3 \cdot ha^{-1}$)
$VFi_{2,ij}$, $VFt_{2,ij}$, $VRi_{2,ij}$, $VRt_{2,ij}$, $VSab_{2,ij}$:	Volume marchand des groupes d'espèces Fi, Ft, Ri, Rt, Sab, respectivement, de la placette *i* à la fin de l'intervalle *j* ($m^3 \cdot ha^{-1}$)
$StFi_{2,ij}$, $StFt_{2,ij}$, $StRi_{2,ij}$, $StRt_{2,ij}$, $StSab_{2,ij}$:	Surface terrière marchande des groupes d'espèces Fi, Ft, Ri, Rt, Sab, respectivement, de la placette *i* à la fin de l'intervalle *j* ($m^2 \cdot ha^{-1}$)
$NFi_{2,ij}$, $NFt_{2,ij}$, $NRi_{2,ij}$, $NRt_{2,ij}$, $NSab_{2,ij}$:	Nombre de tiges marchandes des groupes d'espèces Fi, Ft, Ri, Rt, Sab, respectivement, de la placette *i* à la fin de l'intervalle *j* (tiges·400 m^{-2})
$Hd_{2,ij}$:	Hauteur dominante de la placette *i* à la fin de l'intervalle *j* (m)
$Age_{1,ij}$:	Âge moyen des arbres codominants et dominants de la placette *i* au début de l'intervalle *j* (années)
Δt_{ij} :	Nombre d'années dans l'intervalle *j* de la placette *i*
ln :	Logarithme naturel

Annexe 5 (suite)

Valeurs estimées des paramètres

VFi_2					VFt_2					VRi_2				
Coefficient	Sous-domaine	Paramètre (erreur-type)		Valeur de t*	Coefficient	Sous-domaine	Paramètre (erreur-type)		Valeur de t*	Coefficient	Sous-domaine	Paramètre (erreur-type)		Valeur de t*
$a_{1,sd}$	1	1,5623	(0,0181)	86,3	$b_{1,sd}$	1	1,6276	(0,0155)	104,7	$c_{1,sd}$	1-2-3**	1,4123	(0,0114)	123,7
	2est	1,4229	(0,0315)	45,2		2est	1,5220	(0,0121)	125,4		4est-4ouest	1,3413	(0,0087)	154,7
	2ouest	1,4631	(0,0154)	95,1		2ouest	1,5462	(0,0143)	108,3		5est-5ouest	1,3182	(0,0097)	135,8
	3est	1,3459	(0,0151)	88,9		3est	1,5043	(0,0086)	174,0		6est-6ouest	1,2147	(0,0126)	96,7
	3ouest	1,3751	(0,0109)	126,6		3ouest	1,5473	(0,0075)	205,5	c_2		0,1618	(0,0028)	58,6
	4est	1,2963	(0,0135)	95,7		4est	1,3686	(0,0131)	104,8	c_3		0,0063	(0,0002)	38,0
	4ouest	1,3459	(0,0098)	137,3		4ouest	1,5276	(0,0084)	182,7	c_4		-0,2191	(0,0021)	-105,1
	5est	1,2153	(0,0173)	70,3		5est	1,5148	(0,0321)	47,2	$c_{5,sd}$	1-2-3**	1,1194	(0,0054)	208,0
	5ouest	1,3076	(0,0133)	100,5		5ouest	1,5510	(0,0489)	31,7		4est-4ouest	1,1463	(0,0051)	224,5
	6est	1,2201	(0,0236)	51,6	b_2		0,0604	(0,0018)	32,9		5est-5ouest	1,1531	(0,0054)	213,7
	6ouest	1,3473	(0,0236)	57,0	b_3		0,0009	(0,0001)	8,9		6est-6ouest	1,1756	(0,0058)	202,7
a_2		0,0812	(0,0024)	34,6	b_4		-0,2015	(0,0013)	-151,9	c_6		0,0099	(0,0004)	27,0
a_3		0,0024	(0,0001)	18,4	$b_{5,sd}$	1	1,1952	(0,0052)	230,6	c_7		-0,0015	(0,0000)	-32,8
a_4		-0,2330	(0,0018)	-127,1		2est	1,2092	(0,0044)	273,3					
$a_{5,sd}$	1	1,1279	(0,0064)	175,5		2ouest	1,2221	(0,0050)	242,3					
	2est	1,1766	(0,0118)	99,3		3est	1,2130	(0,0035)	344,5					
	2ouest	1,1645	(0,0057)	204,2		3ouest	1,2170	(0,0031)	396,6					
	3est	1,2100	(0,0061)	198,4		4est	1,2542	(0,0048)	262,3					
	3ouest	1,2021	(0,0046)	260,7		4ouest	1,2097	(0,0035)	347,3					
	4est	1,2271	(0,0053)	230,8		5est	1,1914	(0,0122)	98,0					
	4ouest	1,2095	(0,0046)	261,7		5ouest	1,2012	(0,0232)	51,9					
	5est	1,2326	(0,0068)	180,9	b_6		0,0056	(0,0002)	27,6					
	5ouest	1,2128	(0,0054)	223,4	b_7		-1,0253	(0,1186)	-8,6					
	6est	1,2215	(0,0084)	146,2										
	6ouest	1,2054	(0,0082)	147,6										
a_6		0,0127	(0,0003)	44,3										
a_7		4,2154	(0,1791)	23,5										

* Valeur de la statistique t de Student.
** Sous-domaines 1, 2est, 2ouest, 3est et 3ouest.

Annexe 5 (suite et fin)

Valeurs estimées des paramètres (suite)

VRt_2				$VSab_1$			
Coefficient	Sous-domaine	Paramètre (erreur-type)	Valeur de t*	Coefficient	Sous-domaine	Paramètre (erreur-type)	Valeur de t*
$d_{1,sd}$	1	1,3912 (0,0326)	42,7	$e_{1,sd}$	1	1,5694 (0,0345)	45,4
	2est	1,0681 (0,0329)	32,5		2est	1,5198 (0,0165)	91,9
	2ouest	1,2745 (0,0233)	54,7		2ouest	1,5982 (0,0218)	73,4
	3est	1,1599 (0,0175)	66,2		3est	1,5014 (0,0097)	155,0
	3ouest	1,2903 (0,0134)	96,4		3ouest	1,5329 (0,0111)	137,9
	4est	1,2805 (0,0182)	70,2		4est	1,4204 (0,0089)	159,3
	4ouest	1,2709 (0,0135)	94,0		4ouest	1,5107 (0,0084)	178,9
	5est	1,2571 (0,0171)	73,4		5est	1,2727 (0,0074)	172,7
	5ouest	1,2303 (0,0194)	63,4		5ouest	1,5571 (0,0137)	113,3
	6est	1,1247 (0,0144)	77,9		6est	1,2954 (0,0085)	153,3
	6ouest	0,9907 (0,0176)	56,3		6ouest	1,4092 (0,0183)	77,0
d_2		0,1465 (0,0031)	47,3	e_2		0,0238 (0,0011)	20,8
d_3		0,0044 (0,0002)	26,6	e_3		0,0010 (0,0002)	6,4
d_4		-0,1781 (0,0020)	-88,1	e_4		-0,3458 (0,0016)	-217,8
$d_{5,sd}$	1	1,0045 (0,0104)	96,4	$e_{5,sd}$	1	1,3824 (0,0141)	98,1
	2est	1,0968 (0,0112)	97,7		2est	1,3805 (0,0063)	218,9
	2ouest	1,0300 (0,0078)	132,3		2ouest	1,3595 (0,0089)	152,4
	3est	1,0685 (0,0066)	162,8		3est	1,3799 (0,0037)	370,8
	3ouest	1,0264 (0,0053)	192,3		3ouest	1,3866 (0,0047)	294,8
	4est	1,0187 (0,0065)	156,5		4est	1,3980 (0,0034)	406,4
	4ouest	1,0349 (0,0057)	183,0		4ouest	1,3869 (0,0035)	397,5
	5est	1,0411 (0,0067)	154,7		5est	1,4278 (0,0030)	469,2
	5ouest	1,0553 (0,0078)	135,3		5ouest	1,3450 (0,0054)	247,5
	6est	1,0838 (0,0061)	178,7		6est	1,4234 (0,0030)	475,2
	6ouest	1,1292 (0,0067)	168,0		6ouest	1,3988 (0,0067)	209,3
d_6		0,0196 (0,0004)	51,7	e_6		0,0129 (0,0002)	57,8
d_7		-0,0009 (0,0000)	-27,1	e_7		-0,0001 (0,0000)	-5,8

* Valeur de la statistique t de Student.

Annexe 6. Biais moyen pour le nombre de tiges marchandes par groupe d'espèces en fonction du sous-domaine bioclimatique et de l'horizon de simulation, dans les placettes n'ayant pas fait l'objet de coupe (tiges·ha^{-1}; valeurs relatives entre parenthèses; n : nombre de placettes; Fi : feuillus intolérants; Ft : feuillus tolérants; Ri : résineux intolérants; Rt : résineux tolérants; Sab : sapin baumier)

Sous-domaine	Horizon de simulation	Groupe d'espèces														
		Fi			Ft			Ri			Rt			Sab		
		n	Biais		n	Biais		n	Biais		n	Biais		n	Biais	
1	7-12 ans	71	-6	(-2,5 %)	77	-3	(-0,7 %)				55	-23	(-7,3 %)	37	-16	(-10,6 %)
	16-25 ans	34	1	(0,6 %)	41	35	(7,4 %)									
2est	7-12 ans	75	25	(11,2 %)	130	24	(5,0 %)				90	1	(0,3 %)	85	-12	(-4,3 %)
	16-25 ans	35	-13	(-7,1 %)	70	-2	(-0,4 %)				52	4	(1,5 %)	42	-29	(-9,1 %)
	25-31 ans				35	-15	(-3,0 %)									
2ouest	7-12 ans	131	2	(0,7 %)	146	2	(0,6 %)				96	2	(0,7 %)	77	5	(2,2 %)
	16-25 ans	64	14	(6,9 %)	82	-8	(-1,9 %)				40	3	(1,2 %)			
	25-31 ans	45	5	(2,4 %)	54	6	(1,4 %)									
3est	7-12 ans	344	12	(5,1 %)	422	1	(0,2 %)				372	2	(0,7 %)	418	13	(4,1 %)
	16-25 ans	218	10	(4,4 %)	277	-7	(-1,9 %)				215	-7	(-2,6 %)	250	-18	(-6,3 %)
	25-31 ans	34	-50	(-41,0 %)	60	-41	(-9,7 %)				33	-19	(-8,3 %)	46	-31	(-10,6 %)
3ouest	7-12 ans	403	4	(1,6 %)	538	-4	(-1,1 %)	59	11	(6,5 %)	446	-3	(-1,5 %)	422	-6	(-3,9 %)
	16-25 ans	256	-5	(-2,0 %)	357	-1	(-0,3 %)	36	-4	(-4,2 %)	280	10	(4,8 %)	240	-5	(-3,2 %)
	25-31 ans	177	-11	(-4,9 %)	233	-6	(-1,8 %)				177	22	(10,2 %)	162	22	(11,9 %)
4est	7-12 ans	332	4	(1,3 %)	226	6	(2,7 %)				326	2	(0,8 %)	343	29	(6,6 %)
	16-25 ans	120	-8	(-2,4 %)	95	5	(2,4 %)				122	-1	(-0,4 %)	129	-15	(-3,3 %)
	25-31 ans	62	-44	(-13,8 %)	50	7	(2,8 %)				56	7	(2,1 %)	59	-52	(-15,8 %)
4ouest	7-12 ans	815	-4	(-1,2 %)	459	0	(0,2 %)	216	-3	(-0,9 %)	861	-12	(-3,8 %)	767	-7	(-4,3 %)
	16-25 ans	492	10	(3,2 %)	317	-2	(-1,2 %)	85	-25	(-11,8 %)	499	-11	(-3,1 %)	445	-6	(-3,5 %)
	25-31 ans	215	-3	(-1,4 %)	153	-16	(-9,0 %)				226	-30	(-8,0 %)	199	1	(0,3 %)
5est	7-12 ans	439	-5	(-2,0 %)	57	-3	(-2,1 %)				540	12	(3,3 %)	545	12	(1,8 %)
	16-25 ans	145	38	(10,3 %)							181	26	(7,1 %)	177	-15	(-2,7 %)
	25-31 ans	79	81	(18,7 %)							97	57	(15,0 %)	97	6	(1,2 %)
5ouest	7-12 ans	397	-2	(-0,4 %)	46	0	(0,4 %)	232	-2	(-0,4 %)	497	-1	(-0,3 %)	301	17	(6,1 %)
	16-25 ans	201	4	(1,1 %)				108	-8	(-2,0 %)	247	8	(1,5 %)	150	-57	(-36,4 %)
	25-31 ans	40	17	(5,0 %)							49	20	(5,8 %)	35	-86	(-35,8 %)
6est	7-12 ans	290	9	(4,9 %)				122	-4	(-3,4 %)	1131	5	(0,7 %)	898	10	(2,3 %)
	16-25 ans	128	11	(5,9 %)				72	-7	(-7,7 %)	594	-7	(-0,9 %)	469	6	(1,7 %)
	25-31 ans										61	-28	(-5,1 %)	34	-35	(-12,2 %)
6ouest	7-12 ans	159	1	(0,8 %)				262	3	(0,8 %)	671	2	(0,2 %)	176	-4	(-2,4 %)
	16-25 ans	73	4	(2,3 %)				99	21	(6,7 %)	297	19	(2,3 %)	88	-22	(-15,3 %)
	25-31 ans										63	44	(5,6 %)			

Annexe 7. Biais moyen pour le diamètre moyen quadratique par groupe d'espèces en fonction du sous-domaine bioclimatique et de l'horizon de simulation, dans les placettes n'ayant pas fait l'objet de coupe (cm; valeurs relatives entre parenthèses; n : nombre de placettes; Fi : feuillus intolérants; Ft : feuillus tolérants; Ri : résineux intolérants; Rt : résineux tolérants; Sab : sapin baumier)

Sous-domaine	Horizon de simulation	Groupe d'espèces														
		Fi			Ft			Ri			Rt			Sab		
		n	Biais		n	Biais		n	Biais		n	Biais		n	Biais	
1	7-12 ans	70	1,5	(7,2 %)	77	0,2	(1,4 %)				54	1,4	(6,6 %)	36	0,9	(6,6 %)
	16-25 ans				41	0,5	(2,8 %)									
2est	7-12 ans	71	0,5	(3,3 %)	130	0,7	(3,6 %)				90	0,2	(1,1 %)	81	0,2	(1,6 %)
	16-25 ans	32	1,5	(8,3 %)	70	1,1	(5,3 %)				50	-0,5	(-2,7 %)	39	0,2	(1,1 %)
	25-31 ans				35	2,0	(9,5 %)									
2ouest	7-12 ans	129	0,6	(2,8 %)	145	0,0	(0,0 %)				92	-0,3	(-1,3 %)	73	-1,4	(-10,1 %)
	16-25 ans	61	1,0	(4,3 %)	78	0,4	(2,1 %)				39	-0,9	(-3,9 %)			
	25-31 ans	44	1,8	(7,2 %)	53	-0,3	(-1,5 %)									
3est	7-12 ans	337	0,9	(5,1 %)	422	0,5	(2,3 %)				362	0,5	(2,4 %)	404	-0,3	(-2,2 %)
	16-25 ans	210	1,2	(6,4 %)	269	0,4	(1,7 %)				212	0,8	(3,8 %)	236	-1,2	(-7,4 %)
	25-31 ans	32	3,9	(17,2 %)	60	0,9	(4,0 %)				33	1,4	(6,3 %)	43	0,0	(0,3 %)
3ouest	7-12 ans	397	1,2	(5,5 %)	535	0,2	(1,2 %)	58	0,4	(1,8 %)	439	-0,5	(-2,2 %)	365	-1,4	(-9,8 %)
	16-25 ans	248	2,1	(8,9 %)	346	-0,1	(-0,7 %)	32	1,3	(4,4 %)	264	-1,4	(-5,9 %)	217	-1,4	(-9,5 %)
	25-31 ans	171	2,0	(8,2 %)	231	-0,1	(-0,4 %)				174	-1,8	(-7,5 %)	158	0,0	(0,1 %)
4est	7-12 ans	332	1,0	(6,3 %)	224	-0,3	(-1,5 %)				321	0,3	(1,7 %)	336	0,2	(1,0 %)
	16-25 ans	120	1,6	(10,0 %)	93	-1,6	(-9,6 %)				119	-0,5	(-2,7 %)	121	0,1	(0,9 %)
	25-31 ans	60	1,6	(9,5 %)	49	-2,0	(-11,8 %)				55	-1,2	(-6,2 %)	58	-0,0	(-0,1 %)
4ouest	7-12 ans	806	1,2	(6,2 %)	457	0,2	(1,0 %)	202	1,0	(5,0 %)	843	1,1	(6,2 %)	688	-0,4	(-2,5 %)
	16-25 ans	486	1,6	(8,5 %)	311	-0,6	(-2,9 %)	85	2,4	(10,3 %)	491	2,2	(11,1 %)	406	-0,1	(-0,6 %)
	25-31 ans	209	2,3	(11,4 %)	152	0,1	(0,4 %)				221	2,7	(13,7 %)	194	0,1	(0,5 %)
5est	7-12 ans	427	1,2	(7,4 %)	55	0,5	(2,4 %)				534	-0,7	(-3,9 %)	540	0,1	(0,7 %)
	16-25 ans	141	1,2	(7,7 %)							179	-1,5	(-8,4 %)	170	-0,7	(-4,8 %)
	25-31 ans	79	1,8	(11,2 %)							95	-2,3	(-12,1 %)	97	-0,9	(-5,5 %)
5ouest	7-12 ans	389	0,4	(2,5 %)	46	0,5	(2,8 %)	223	0,2	(1,3 %)	494	0,4	(2,4 %)	291	0,4	(2,9 %)
	16-25 ans	194	0,1	(0,6 %)				105	0,1	(0,7 %)	246	0,2	(1,1 %)	140	-1,8	(-12,0 %)
	25-31 ans	40	0,4	(2,2 %)							47	1,3	(6,9 %)	35	-2,0	(-15,9 %)
6est	7-12 ans	265	0,4	(2,3 %)				116	1,4	(9,7 %)	1128	0,1	(0,7 %)	888	0,5	(3,6 %)
	16-25 ans	116	0,4	(2,8 %)				66	1,2	(8,4 %)	594	0,2	(1,0 %)	460	0,7	(4,7 %)
	25-31 ans										61	0,3	(2,2 %)	33	2,5	(16,6 %)
6ouest	7-12 ans	150	0,7	(4,4 %)				254	0,4	(2,7 %)	671	0,1	(0,6 %)	169	1,2	(8,5 %)
	16-25 ans	68	0,8	(4,1 %)				95	-0,2	(-1,4 %)	296	-0,1	(-0,9 %)	82	0,7	(5,2 %)
	25-31 ans										63	-0,4	(-2,6 %)			

Annexe 8. Biais moyen pour la surface terrière marchande par groupe d'espèces en fonction du sous-domaine bioclimatique et de l'horizon de simulation, dans les placettes n'ayant pas fait l'objet de coupe ($m^2 \cdot ha^{-1}$; valeurs relatives entre parenthèses; n : nombre de placettes; Fi : feuillus intolérants; Ft : feuillus tolérants; Ri : résineux intolérants; Rt : résineux tolérants; Sab : sapin baumier)

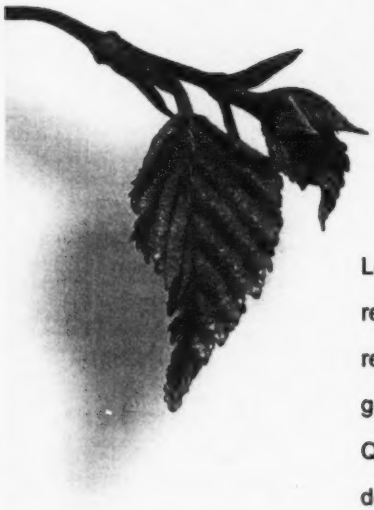
Sous-domaine	Horizon de simulation	Groupe d'espèces														
		Fi			Ft			Ri			Rt			Sab		
		n	Biais		n	Biais		n	Biais		n	Biais		n	Biais	
1	7-12 ans	76	-0,1	(-0,9 %)	84	-0,1	(-0,8 %)				55	-0,0	(-0,4 %)	37	-0,2	(-6,6 %)
	16-25 ans	34	0,6	(6,5 %)	41	0,2	(1,9 %)									
2est	7-12 ans	77	0,2	(4,8 %)	137	0,6	(4,2 %)				90	-0,2	(-2,8 %)	85	-0,4	(-7,8 %)
	16-25 ans	35	0,3	(6,5 %)	70	0,5	(3,0 %)				52	-0,1	(-1,6 %)	42	-0,7	(-12,0 %)
	25-31 ans				35	0,7	(4,3 %)									
2ouest	7-12 ans	137	-0,2	(-2,0 %)	152	-0,1	(-1,1 %)				96	-0,3	(-2,5 %)	77	-0,4	(-12,6 %)
	16-25 ans	64	0,1	(2,0 %)	79	0,4	(2,9 %)				40	-0,4	(-3,6 %)			
	25-31 ans	45	-0,1	(-1,3 %)	54	0,1	(0,4 %)									
3est	7-12 ans	359	0,2	(2,6 %)	442	0,2	(1,5 %)				372	0,1	(0,7 %)	418	0,0	(0,6 %)
	16-25 ans	218	0,2	(2,8 %)	270	-0,1	(-1,0 %)				215	0,2	(1,8 %)	246	-0,8	(-13,5 %)
	25-31 ans	34	-0,3	(-5,6 %)	60	-0,4	(-2,3 %)				33	0,2	(2,0 %)	46	-0,4	(-7,0 %)
3ouest	7-12 ans	473	0,1	(0,7 %)	616	0,0	(-0,3 %)	58	0,3	(6,0 %)	446	-0,3	(-4,2 %)	422	-0,6	(-21,1 %)
	16-25 ans	256	0,1	(0,9 %)	350	0,2	(1,2 %)	35	0,2	(3,3 %)	280	-0,1	(-1,5 %)	235	-0,2	(-8,3 %)
	25-31 ans	177	-0,4	(-5,0 %)	233	-0,2	(-1,5 %)				177	-0,1	(-1,4 %)	162	0,5	(16,1 %)
4est	7-12 ans	342	0,1	(1,7 %)	234	-0,1	(-1,3 %)				326	0,0	(0,2 %)	343	0,4	(4,4 %)
	16-25 ans	120	0,1	(0,9 %)	94	0,1	(1,5 %)				122	-0,5	(-6,2 %)	128	-0,4	(-3,6 %)
	25-31 ans	62	-0,5	(-6,7 %)	49	-0,1	(-1,2 %)				56	-0,7	(-8,1 %)	58	-1,2	(-14,8 %)
4ouest	7-12 ans	867	0,0	(0,3 %)	497	-0,2	(-3,5 %)	212	0,1	(1,0 %)	861	-0,3	(-4,2 %)	767	-0,5	(-14,7 %)
	16-25 ans	492	0,3	(3,9 %)	316	-0,2	(-3,3 %)	85	-0,1	(-1,9 %)	499	0,1	(0,7 %)	445	0,1	(1,9 %)
	25-31 ans	215	-0,1	(-1,3 %)	153	-0,3	(-3,4 %)				226	0,1	(1,4 %)	199	0,1	(2,9 %)
5est	7-12 ans	447	-0,1	(-1,1 %)	60	-0,1	(-3,3 %)				540	-0,2	(-1,9 %)	545	0,1	(0,7 %)
	16-25 ans	145	0,7	(11,3 %)							181	0,2	(2,9 %)	175	-0,1	(-1,2 %)
	25-31 ans	79	1,7	(20,7 %)							97	0,9	(10,4 %)	97	-0,1	(-1,4 %)
5ouest	7-12 ans	407	-0,1	(-0,6 %)	50	-0,0	(-1,1 %)	226	-0,1	(-1,4 %)	497	-0,1	(-1,9 %)	301	0,4	(7,5 %)
	16-25 ans	201	0,1	(1,4 %)				108	-0,4	(-4,2 %)	247	-0,1	(-0,7 %)	150	-1,2	(-44,6 %)
	25-31 ans	40	-0,3	(-3,4 %)							49	0,3	(4,7 %)	35	-2,0	(-61,0 %)
6est	7-12 ans	303	0,2	(4,6 %)				122	0,1	(3,8 %)	1131	0,1	(1,2 %)	898	0,3	(3,9 %)
	16-25 ans	128	0,3	(7,9 %)				72	-0,0	(-2,0 %)	594	0,0	(0,3 %)	469	0,2	(4,3 %)
	25-31 ans										61	-0,3	(-2,4 %)	34	0,6	(11,9 %)
6ouest	7-12 ans	166	0,1	(1,2 %)				262	0,1	(1,6 %)	671	0,1	(0,5 %)	176	0,2	(6,7 %)
	16-25 ans	73	0,5	(9,0 %)				99	0,0	(0,6 %)	297	0,1	(0,4 %)	88	-0,1	(-2,4 %)
	25-31 ans										63	0,6	(5,1 %)			

Annexe 9. Biais moyen pour le volume marchand par groupe d'espèces en fonction du sous-domaine bioclimatique et de l'horizon de simulation, dans les placettes n'ayant pas fait l'objet de coupe ($m^3 \cdot ha^{-1}$; valeurs relatives entre parenthèses; n : nombre de placettes; Fi : feuillus intolérants; Ft : feuillus tolérants; Ri : résineux intolérants; Rt : résineux tolérants; Sab : sapin baumier)

Sous-domaine	Horizon de simulation	Groupe d'espèces														
		Fi			Ft			Ri			Rt			Sab		
		n	Biais		n	Biais		n	Biais		n	Biais		n	Biais	
1	7-12 ans	66	0,4	(0,7 %)	71	-2,0	(-3,3 %)				52	0,1	(0,2 %)	35	-0,5	(-2,9 %)
	16-25 ans	33	5,0	(6,7 %)	40	-1,1	(-1,3 %)							85	-2,4	(-9,5 %)
2est	7-12 ans	75	0,3	(1,1 %)	130	4,2	(4,7 %)				90	-1,5	(-3,7 %)	42	-3,9	(-13,1 %)
	16-25 ans	35	3,9	(12,9 %)	70	5,1	(5,0 %)				52	-0,4	(-0,9 %)			
	25-31 ans				35	6,1	(5,1 %)									
2ouest	7-12 ans	130	-0,6	(-1,1 %)	143	-0,2	(-0,3 %)				95	-2,1	(-2,8 %)	77	-3,2	(-18,4 %)
	16-25 ans	64	-0,1	(-0,1 %)	79	4,8	(4,7 %)				40	-1,4	(-2,0 %)			
	25-31 ans	45	-1,4	(-2,2 %)	54	1,2	(1,2 %)									
3est	7-12 ans	332	0,9	(2,5 %)	399	2,1	(2,7 %)				355	0,1	(0,2 %)	396	0,7	(2,0 %)
	16-25 ans	217	1,1	(2,8 %)	269	-0,5	(-0,6 %)				211	3,1	(5,5 %)	245	-4,2	(-13,3 %)
	25-31 ans	33	2,4	(6,8 %)	59	-1,9	(-1,5 %)				32	6,7	(13,1 %)	45	0,3	(0,7 %)
3ouest	7-12 ans	393	1,5	(2,6 %)	518	0,6	(0,7 %)	58	3,3	(7,6 %)	432	-2,4	(-4,4 %)	409	-4,3	(-31,8 %)
	16-25 ans	256	1,7	(2,7 %)	350	1,5	(1,6 %)	35	0,8	(1,8 %)	279	-1,2	(-1,9 %)	235	-1,1	(-8,1 %)
	25-31 ans	177	-2,7	(-4,1 %)	233	-0,9	(-0,9 %)				177	-0,7	(-1,1 %)	162	3,4	(21,1 %)
4est	7-12 ans	332	1,0	(2,2 %)	226	0,2	(0,5 %)				326	0,0	(0,0 %)	343	2,6	(5,8 %)
	16-25 ans	120	0,3	(0,6 %)	94	1,6	(5,0 %)				122	-3,6	(-7,8 %)	128	-0,4	(-0,8 %)
	25-31 ans	62	-2,3	(-4,6 %)	49	1,0	(2,6 %)				56	-4,8	(-9,8 %)	58	-5,9	(-13,0 %)
4ouest	7-12 ans	813	0,7	(1,4 %)	458	-1,3	(-3,0 %)	212	2,4	(3,6 %)	859	-1,5	(-4,0 %)	766	-2,8	(-17,2 %)
	16-25 ans	492	2,4	(4,4 %)	316	-1,2	(-2,6 %)	85	0,9	(1,8 %)	499	1,6	(3,4 %)	445	1,4	(8,3 %)
	25-31 ans	215	0,1	(0,3 %)	153	0,0	(0,0 %)				226	3,0	(5,4 %)	199	1,2	(7,6 %)
5est	7-12 ans	439	-0,2	(-0,9 %)	56	-0,5	(-2,1 %)				538	-1,4	(-3,4 %)	544	1,2	(1,7 %)
	16-25 ans	145	3,6	(10,5 %)							180	0,7	(1,6 %)	174	1,7	(3,2 %)
	25-31 ans	79	10,1	(22,3 %)							97	5,1	(10,3 %)	97	2,6	(5,3 %)
5ouest	7-12 ans	394	0,0	(0,0 %)	45	0,3	(2,1 %)	226	-0,7	(-1,4 %)	495	-0,9	(-2,3 %)	299	2,3	(9,5 %)
	16-25 ans	201	1,6	(2,5 %)				108	-2,6	(-4,8 %)	247	-1,1	(-2,2 %)	150	-6,3	(-45,9 %)
	25-31 ans	40	-3,9	(-6,6 %)							49	2,9	(6,9 %)	35	-11,2	(-83,2 %)
6est	7-12 ans	289	1,0	(5,1 %)				122	0,1	(1,6 %)	1130	0,3	(0,6 %)	898	2,1	(6,4 %)
	16-25 ans	128	1,5	(7,8 %)				72	-0,4	(-5,1 %)	594	-0,5	(-0,8 %)	469	2,2	(8,4 %)
	25-31 ans										61	-1,9	(-3,6 %)	34	5,4	(21,5 %)
6ouest	7-12 ans	156	0,9	(3,2 %)				262	0,5	(1,7 %)	667	0,2	(0,4 %)	172	2,0	(13,0 %)
	16-25 ans	73	5,7	(14,7 %)				99	1,0	(2,9 %)	297	-0,4	(-0,6 %)	88	0,9	(6,8 %)
	25-31 ans										63	1,2	(2,4 %)			

Annexe 10. Biais moyen pour la surface terrière marchande (*St*, $m^2 \cdot ha^{-1}$), le volume marchand (*V*, $m^3 \cdot ha^{-1}$), le nombre de tiges marchandes (*N*, tiges·ha^{-1}) et le diamètre moyen quadratique (*Dq*, cm), en fonction du sous-domaine bioclimatique, de l'horizon de simulation et du groupe d'espèces, dans les placettes ayant fait l'objet de coupe partielle (valeurs relatives entre parenthèses, n : nombre de placettes; Fi : feuillus intolérants; Ft : feuillus tolérants; Ri : résineux intolérants; Rt : résineux tolérants; Sab : sapin baumier)

Équation	Sous-domaine	Horizon de simulation	Groupe d'espèces											
			Fi			Ft			Rt			Sab		
			n	Biais		n	Biais		n	Biais		n	Biais	
St	2est	7-12 ans	33	-0,4	(-12,9 %)	49	-0,3	(-2,7 %)	31	0,0	(0,0 %)	32	0,4	(6,7 %)
	3est	7-12 ans	55	0,0	(-1,1 %)	92	-0,0	(-0,3 %)	61	0,2	(4,3 %)	71	-0,3	(-5,5 %)
	3ouest	7-12 ans	109	0,9	(15,2 %)	168	0,3	(1,9 %)	123	0,1	(0,6 %)	129	0,6	(18,8 %)
		16-25 ans	37	1,3	(27,3 %)	52	0,7	(5,4 %)	39	1,4	(16,2 %)	41	1,3	(30,4 %)
	4est	7-12 ans	62	0,2	(3,5 %)	59	0,3	(3,1 %)	62	0,2	(3,5 %)	71	-1,0	(-14,0 %)
	4ouest	7-12 ans	75	0,2	(2,1 %)	96	0,3	(2,5 %)	87	0,6	(11,8 %)	91	1,0	(27,6 %)
		16-25 ans				32	1,4	(8,8 %)						
V	2est	7-12 ans	33	-3,0	(-16,5 %)	49	-1,4	(-1,6 %)	31	-0,5	(-1,1 %)	32	3,1	(10,6 %)
	3est	7-12 ans	54	0,4	(1,4 %)	91	0,5	(0,5 %)	61	1,8	(5,9 %)	71	-1,6	(-5,7 %)
	3ouest	7-12 ans	108	7,2	(16,6 %)	167	1,8	(1,8 %)	123	-0,8	(-1,4 %)	129	3,8	(23,6 %)
		16-25 ans	37	10,6	(30,4 %)	52	6,4	(6,7 %)	38	11,6	(20,1 %)	41	8,2	(36,6 %)
	4est	7-12 ans	61	1,6	(3,5 %)	59	2,1	(2,9 %)	62	1,0	(3,0 %)	71	-4,8	(-12,7 %)
	4ouest	7-12 ans	75	0,7	(1,4 %)	96	3,1	(3,1 %)	87	5,0	(15,2 %)	91	5,9	(31,7 %)
		16-25 ans				32	13,3	(10,3 %)						
N	2est	7-12 ans	33	-10	(-7,4 %)	49	-11	(-2,5 %)	31	8	(2,5 %)	32	7	(2,3 %)
	3est	7-12 ans	54	-5	(-3,0 %)	91	9	(2,5 %)	61	5	(2,7 %)	71	-6	(-1,9 %)
	3ouest	7-12 ans	108	23	(15,5 %)	167	18	(5,4 %)	123	16	(8,5 %)	129	17	(10,1 %)
		16-25 ans	37	40	(26,0 %)	52	40	(11,9 %)	39	61	(22,7 %)	41	46	(19,1 %)
	4est	7-12 ans	61	-4	(-1,5 %)	59	13	(4,6 %)	62	3	(1,5 %)	71	-50	(-13,1 %)
	4ouest	7-12 ans	75	27	(11,7 %)	96	16	(6,0 %)	87	1	(0,9 %)	91	48	(24,0 %)
		16-25 ans				32	40	(12,9 %)						
Dq	2est	7-12 ans				49	0,5	(2,7 %)				32	0,2	(1,5 %)
	3est	7-12 ans	52	1,4	(8,2 %)	91	-0,1	(-0,2 %)	57	0,6	(3,3 %)	68	-0,5	(-3,3 %)
	3ouest	7-12 ans	102	2,4	(10,6 %)	167	0,0	(-0,2 %)	117	-0,0	(-0,1 %)	122	1,0	(6,4 %)
		16-25 ans	34	3,5	(15,9 %)	52	-0,1	(-0,6 %)	38	-0,2	(-0,9 %)	40	0,3	(2,3 %)
	4est	7-12 ans	59	1,7	(9,7 %)	59	0,2	(1,0 %)	62	0,7	(3,5 %)	69	0,1	(0,8 %)
	4ouest	7-12 ans	72	0,8	(3,1 %)	96	0,0	(-0,1 %)	86	3,2	(14,1 %)	87	1,5	(9,5 %)
		16-25 ans				32	-0,1	(-0,5 %)						



Les projets de modélisation de la croissance et du rendement des forêts menés par la Direction de la recherche forestière sont essentiels à un aménagement efficace des ressources forestières du Québec. Ainsi, les prévisions de la croissance issues de ces modèles sont indispensables aux aménagistes, qui doivent notamment élaborer des plans d'aménagement forestier et déterminer la possibilité forestière. Un modèle à l'échelle du peuplement, nommé NATURA-2009, a été développé à cette fin, pour les forêts du Québec.

Ressources naturelles et Faune
Québec

Le papier des pages intérieures de ce Mémoire de recherche forestière est fabriqué à 100% avec des fibres recyclées.